

ЗМІСТ

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

А. О. Сулим, І. І. Федорак, В. О. Шушмарченко, О. О. Бородай Аналіз технічних характеристик бункерних вагонів для перевезення цементу	7
С. О. Столетов, П. О. Хозя, М. В. Григорошенко Ходові динамічні та міцносні дослідження вагона-хопера для перевезення цементу моделі 19-7160	27
А. О. Каграманян, Т. А. Аракелян Сучасний стан та удосконалення нормативної бази систем опирання котлів залізничних цистерн	45
С. М. Турпак, О. О. Острогляд, О. О. Олениця, Г. О. Лебідь, Т. В. Харченко Економіко-математичне обґрунтування зниження собівартості перевезень у вузлах взаємодії автомобільного та залізничного промислового транспорту	55
О. В. Фомін, В. М. Іщенко, Н. С. Брайковська, І. В. Ніколаєнко Методи зменшення поздовжніх зусиль у зчехах рейкового рухомого складу шляхом застосування інтелектуальних систем керування	66
С. Ю. Сапронова, О. В. Воробйов Обґрунтування вибору способу відновлення коліс залізничного рухомого складу при наднормативному зносі гребеня на основі техніко-економічного критерію	77
А. С. Маслій, В. А. Геврасьов, Р. М. Антоненко, Я. В. Якубовський Математичне моделювання макродинаміки рейкового рухомого складу з багатодвигунним тяговим електроприводом.....	92
Д. А. Іванченко, А. М. Фоміна Методологічні основи модернізації технологічної взаємодії залізничного та автомобільного транспорту.....	113
І. В. Гладких, Д. О. Брусило Тенденції розвитку залізничної галузі світу у фокусі міжнародних подій	124
І. Е. Мартинов, А. В. Труфанова, В. О. Шовкун, М. В. Дмитренко Аналіз напружено-деформованого стану кришок розвантажувальних люків напіввагонів при скиданні вантажу.....	136
Ж. О. Семко Актуальні питання щодо застосування нормативних документів під час здійснення оцінки відповідності у сфері залізничного транспорту.....	151
К. Ю. Холод, Т. В. Попова Бронювання працівників як запорука стабільного функціонування підприємств галузі залізничного транспорту.....	163
Вимоги до оформлення статей.....	178

CONTENTS

«RAILBOUND ROLLING STOCK»

A. O. Sulym, I. I. Fedorak, V. O. Shushmarchenko, O. O. Borodai Analysis of the technical characteristics of hopper wagons for transporting cement	23
S. O. Stoletov, P. O. Khozia, M. V. Hryhoroshenko Running dynamic and strength studies of the 19-7160 model hopper car for transporting cement	42
A. O. Kahramanyan, T. A. Arakelyan Current status and improvements to the regulatory framework for boiler support systems in railway tankers.....	52
S. M. Turpak, O. O. Ostrohlyad, O. O. Olenytsia, H. O. Lebid, T. V. Kharchenko Economic and mathematical substitution of reducing the cost of transportation in the interaction nodes of road and rail industrial transport	63
O. V. Fomin, V. M. Ishchenko, N. S. Braikovska, I. V. Nikolaienko Methods for reducing longitudinal forces in rail rolling stock couplings by using intelligent control systems	74
S. Yu. Sapronova, O. V. Vorobiov A technical-economic approach to selecting wheel restoration methods for railway rolling stock under flange wear beyond allowable limits.....	89
A. S. Maslii, V. A. Gevrasov, R. M. Antonenko, I. V. Iakubovskiy Mathematical modeling of macrodynamics of rail rolling stock with multi-motor traction electric drive.....	111
D. A. Ivanchenko, A. M. Fomina Methodological bases of modernization of technological interaction of railway and road transport.....	121
I. V. Hladkykh, D. O. Brusylo Trends in the global railway industry in the spotlight of international events.....	133
I. E. Martynov, A. V. Trufanova, V. O. Shovkun, M. V. Dmytrenko Analysis of the stress and deformation state of the lids of unloading hatches of gondola cars during cargo unloading.....	147
Z. O. Semko Current issues regarding the application of regulatory documents during conformity assessment in the field of railway transport.....	160
K. Y. Kholod, T. V. Popova Reserving employees as a guarantee of stable operation for enterprises in the railway transport sector.....	175
Requirements for drawing-up of articles.....	183

А. О. Сулим

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна

Тел.: +380536660354, E-mail: sulim1.ua@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8144-8971>

І. І. Федорак

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна

Тел.: +380689745767, E-mail: ivigfed@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4503-1858>

В. О. Шушмарченко

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна

Тел.: +380536661384, E-mail: vasylkremen77@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7580-8501>

О. О. Бородай

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна

Тел.: +380536661384, E-mail: saleksbor@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8677-5776>

АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУНКЕРНИХ ВАГОНІВ ДЛЯ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ЦЕМЕНТУ

В статті проаналізовано існуючі дослідження за напрямком створення бункерних вантажних вагонів для перевезення цементу та обґрунтовано необхідність проведення комплексного аналізу технічних характеристик новостворених моделей бункерних вагонів для перевезення цементу. Встановлено, що основу експлуатаційного парку вагонів-цементовозів складають бункерні вагони-хопери моделей 11-715 та 19-758 виробництва ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод», що виготовлялись у 1980-1995 роках. Визначено необхідність оновлення вітчизняного вантажного парку новоствореними вагонами для перевезення цементу.

Встановлено, що протягом останніх п'ятнадцяти років, вітчизняними вагонобудівними заводами створено не менше ніж 6 нових моделей бункерних вагонів для перевезення цементу з покращеними технічними та експлуатаційними характеристиками: 19-7075, 19-7160 виробництва ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод»; 19-4142 – ТОВ «ТАС Дніпровагонмаш»; 19-9967, 17-1890 – ТОВ «ДМЗ «Карпати»; 19-8530 – ТОВ «ДМЗ «Карпати» та ТОВ «Полтавський тепловозоремонтний завод». Виконано порівняння технічних характеристик зазначених новостворених моделей бункерних вагонів для перевезення цементу.

© Сулим А. О., Федорак І. І., Шушмарченко В. О., Бородай О. О., 2026

Проаналізовано результати комплексних науково-експериментальних досліджень новостворених моделей бункерних вагонів для перевезення цементу в рамках їх постановки на виробництво, що включали проведення статичних міцносних випробувань, ходових динамічних та міцносних випробувань, стаціонарних та поїзних випробувань, випробувань з визначення рівня зовнішнього шуму та інші види випробувань.

Наукова новизна полягала у розробленні вимог до технічних характеристик інноваційних вагонів наступного покоління для перевезення цементу з урахуванням аналізу результатів науково-експериментальних досліджень сучасних новостворених моделей вагонів цього типу.

Практична значимість полягає у можливості використання отриманих результатів досліджень у цій статті для створення нормативного документа, який буде встановлювати загальні технічні вимоги до проєктування інноваційних бункерних вагонів для перевезення цементу. Також результати цієї роботи можуть бути корисними під час створення нових моделей бункерних вагонів для перевезення цементу чи глибокій модернізації існуючих, а також підвищення ефективності їх експлуатації.

За результатами виконаних досліджень сформульовано висновки та надано рекомендації щодо можливого подальшого використання отриманих даних.

Ключові слова: бункерний вагон, вагон-цементовоз, гальмівна система, залізнична колія, міцність, строк служби, ходові показники, шум.

Вступ та постановка проблеми. Вагон для перевезення цементу – це спеціалізований критий вагон, призначений для безтарного перевезення насипом цементу та інших будівельних та гранульованих сипких вантажів, що потребують захисту від атмосферних опадів. Згідно даних з відкритих джерел станом на кінець серпня 2020 року у вітчизняному парку вантажних вагонів налічувалось 7079 бункерних вагонів для перевезення цементу (близько 4% від загальної кількості вагонів у парку), з яких 5814 одиниць (82%) мають вичерпаний нормативний строк служби, а 1265 одиниць (18%) – незавершений нормативний строк служби [1].

На даний час основу парку вагонів-цементовозів складають бункерні вагонихопери для перевезення цементу моделей 11-715 та 19-758 виробництва ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод», що виготовлялись у 1980-1995 роках. Вагони моделі 11-715 серійно виготовлялись з 1961 по 1989 роки, вагони моделі 19-758 – з 1986 року по теперішній час. Зовнішній вигляд зазначених моделей бункерних вагонів для перевезення цементу зображено на рис. 1, їх технічні характеристики представлено в табл. 1.



а)



б)

Рис. 1. Зовнішній вигляд вагонів-цементовозів моделей 11-715 (а) та 19-758 (б)

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таблиця 1. – Технічні характеристики бункерних вагонів-хоперів для перевезення зерна моделей 11-715 та 19-758

Найменування характеристики	Модель 11-715	Модель 19-758
Вантажопідйомність, т	67	72
Об'єм кузова, м ³	55	60
Маса тари вагона, не більше, т	19,0	19,8 (19,1*)
Матеріал кузова	09Г2С, 09Г2Д, 09Г2, 09Г2СД-12	09Г2С, 09Г2Д, 09Г2, 09Г2СД-12
Розрахункове навантаження від колісної пари на рейки, кН (тс)	215,3 (21,95)	229,5 (23,4) 225,1* (22,95*)
Погонне навантаження, кН/м (тс/м)	70,78 (7,21)	75,55 (7,7) 74,97* (7,64*)
Кількість люків, шт		
завантажувальних	4	4
розвантажувальних	4	4
Ширина колії, мм	1520	1520
Максимальна швидкість, км/год	120	120
База вагона, мм	7700	7700
Довжина по осях зчеплення, мм	11920	11920
Довжина по кінцевим балкам рами, мм	10700	10700
Максимальна ширина, мм	3278	3278
Висота від рівня головки рейки, мм	4180	4405
Кількість осей, шт	4	4
Модель візка	18-100	18-100 (18-7055*)
Габарит по ДСТУ Б.В.2.3-29	1-Т	1-Т
Нормативний строк служби, років	26	26
*Примітка. Технічні характеристики вагона у модифікації з 2019 року виготовлення		

Враховуючи сучасні тенденції розвитку вантажного вагонобудування, до основних недоліків конструкцій моделей 11-715 та 19-758 слід віднести наступні: низька вантажопідйомність, високе значення коефіцієнта тари, використання в конструкції вагонів сталей та сплавів недостатньої міцності і корозійної стійкості, недосконала конструкція розвантажувального механізму, підвищена матеріалоємність та трудомісткість виготовлення, а також наявний значний фізичний та моральний знос вагонів.

Таким чином, наявний вітчизняний парк бункерних вагонів-цементовозів потребує оновлення сучасними інноваційними вагонами з покращеними технічними та експлуатаційними характеристиками. Особливо актуальним питання оновлення цього типу рухомого складу постане у післявоєнний період відбудови країни внаслідок значного попиту на виконання будівельних робіт.

Аналіз останніх досліджень. У публікації [2] розглянуто призначення, класифікацію та конструкцію кузовів сучасних критих вагонів. Виконано огляд конструкцій кузовів, як універсальних, так і спеціалізованих критих вагонів. Наведено конструктивні особливості вагонів-хоперів для перевезення цементу моделей 19-758 та 19-7075 виробництва ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод».

У статтях [3, 4] виконано аналіз сучасного стану парку вагонів-хоперів для перевезення зерна в Україні. Висвітлені конструкційні особливості вагонів-хоперів різного типу, визначена конструктивна досконалість зерновозів із сімейства бункерних вагонів-хоперів та перспективи її розвитку. Запропоновано кузов нового покоління «краплеподібної» форми зі збільшеним об'ємом за рахунок максимального використання розрахункового габариту.

Дослідження [5] присвячене комплексному розгляду та аналізу технічних характеристик моделей сучасних інноваційних вагонів-хоперів для перевезення зерна вітчизняного виробництва, що були створені та поставлені на серійне виробництво протягом останніх десяти років. Визначено основні напрямки вдосконалення конструкції вагонів-хоперів для перевезення зерна нового покоління. Запропоновано технічні вимоги до бункерних вагонів-хоперів для перевезення зерна наступного покоління.

У статті [6] викладено методику та представлено результати експериментальних досліджень напружено-деформованого стану конструкції вагона для цементу бункерного типу під час проведення комплексу робіт з визначення показників міцнісних та динамічних якостей. Описано конструктивні особливості вагона для цементу бункерного типу моделі 17-1890, що відрізняє його від інших типів вантажних вагонів. Проаналізовано результати статичних міцнісних, ходових динамічних, ходових міцнісних науково-експериментальних досліджень та досліджень на співудар нормативними силами. Встановлено, що отримані фактичні значення показників в ході науково-експериментальних досліджень не перевищують допустимих нормативних величин.

У публікації [7] висвітлено результати науково-експериментальних досліджень вагона-думпкара моделі 33-7141 (статичних випробувань на міцність від дії вертикальних квазістатичних навантажень та навантажень, що виникають при ремонті і обслуговуванні вагона, випробувань падаючим вантажем та випробувань на завантаження-розвантаження, ходових динамічних, ходових міцнісних випробувань та випробувань на співудар нормативними силами).

Дослідження [8] присвячене комплексному розгляду та аналізу технічних характеристик моделей сучасних інноваційних вагонів-думпкарів для промислового транспорту вітчизняного виробництва, які були створені та поставлені на серійне виробництво протягом останніх десяти років. За результатами порівняльного аналізу технічних характеристик вагонів-думпкарів минулого покоління до сучасних моделей вагонів-думпкарів встановлено, що одними з головних переваг останніх є підсилення міцності і надійності окремих вузлів та систем. Визначено основні напрямки вдосконалення конструкції сучасних моделей вагонів-думпкарів вітчизняного виробництва для промислового залізничного транспорту. Запропоновано технічні вимоги до вагонів-думпкарів наступного покоління, які планується створити та впровадити до серійного виробництва у 2022-2026 роках для експлуатації на коліях промислових підприємств.

У статті [9] розглянуто моделі вагонів-думпкарів, які складають основну частку у вагонному парку магістрального залізничного транспорту колії 1520 мм. Наведено технічні характеристики найбільш поширених моделей вагонів-думпкарів магістрального призначення. Наведено сучасні моделі вагонів-думпкарів вітчизняного та іноземного виробництва для магістрального залізничного транспорту колії 1520 мм, які були створені та поставлені у серійне виробництво протягом останніх років. За результатами порівняльного аналізу технічних характеристик вагонів-

думпкарів минулого покоління до сучасних моделей вагонів-думпкарів встановлено, що одними з головних переваг останніх є зниження маси тари, підвищення вантажопідйомності і об'єму кузова, підсилення міцності і надійності окремих вузлів та систем. Запропоновано технічні вимоги до вагонів-думпкарів наступного покоління, які планується створити та впровадити до серійного виробництва у найближчі роки для експлуатації на коліях магістрального залізничного транспорту.

У публікації [10] виконано експериментальні дослідження динамічних та міцносних якостей вагона-платформи моделі 13-1894 для перевезення великотоннажних контейнерів. Описано конструктивні особливості вагона-платформи, що відрізняє його від інших вагонів-платформ. Проаналізовано результати отриманих науково-експериментальних досліджень вагона-платформи та виконано порівняння фактичних значень із нормативними.

У роботі [11] наведено результати ходових динамічних та міцносних випробувань вагона-платформи моделі 13-7133 на візках з ковзунами зазорного типу для перевезення крупнотоннажних контейнерів. За результатами аналізу отриманих фактичних значень у процесі випробувань та їх порівняння із нормативними доведено відповідність динамічних та міцносних показників вагона-платформи сучасним вимогам.

У публікації [12] наведено результати експериментальних досліджень технічних характеристик вагона-платформи моделі 13-4155. Встановлено, що вагон-платформа моделі 13-4155 для перевезення великотоннажних контейнерів може експлуатуватися на всій мережі залізниць колії 1520 мм зі встановленими для вантажних вагонів швидкостями, але не більше 120 км/год.

У статті [13] наведено особливості створення шестивісного зчленованого 80 футового вагона-платформи типу Sggrss моделі 13-7147. Наведено результати теоретичних досліджень та комплексних натурних випробувань на відповідність стандартам Європейського Союзу. Результати виконаних випробувань дослідного зразка вагона-платформи моделі 13-7147 підтвердили повну відповідність його технічних показників вимогам TSI до вантажних вагонів цього класу під час руху зі швидкостями до 120 км/год у залізничній системі Європейського Союзу.

Дослідження [14] присвячено створенню вітчизняного вагона моделі 19-7154 для перевезення сипких вантажів, що не потребують захисту від впливу атмосферних опадів. Наведено порівняльний аналіз технічних характеристик новоствореної моделі вагона з існуючими та визначено його переваги. Представлено результати теоретичних розрахунків міцності кузова, вписування вагона в габарит, оцінювання якості руху вагона, гальмівної системи, опору втомі несучих елементів кузова вагона. Проведено комплекс досліджень для підтвердження проектних та розрахункових показників вагона. Результати комплексних досліджень дослідного зразка вагона для сипких вантажів моделі 19-7154 були розглянуті на засіданні приймальної комісії та прийняті як відповідні, з послідуємим отриманням на їх основі сертифікату відповідності вагона.

У роботі [15] запропоновано концепцію піввагона з глухим кузовом нового покоління. Наведено основні техніко-економічні показники піввагона з глухим кузовом нового покоління. Визначено, що головними відмінностями від існуючих аналогів, є збільшене осьове навантаження до 27 тс, габарит 1-ВМ, збільшена вантажопідйомність до 82 т, збільшений об'єм кузова до 100 м³, збільшений нормативний строк служби до 32 років, збільшений міжремонтний пробіг до 1 млн. км.

Стаття [16] присвячена модернізації спеціалізованого вагона-хопера для обкотишів та агломерату моделі 20-9749. Описано запропоновані конструктивні вдосконалення зазначеної моделі спеціалізованого вагона. Приведено методику експериментальних досліджень міцності конструкції спеціалізованого вагона-хопера для обкотишів та агломерату моделі 20-9749 після його модернізації. Встановлено, що максимальні сумарні напруження в елементах конструкції дослідного вагона від дії вертикального статичного навантаження брутто та поздовжнього навантаження при силі удару 3,5 МН не перевищують допустимі нормовані напруження. У результаті проведених ресурсних випробувань на циклічну довговічність несучих елементів конструкції вагона від багаторазової дії ударних навантажень еквівалентного спектру встановлено, що строк служби вагона для обкотишів та агломерату моделі 20-9749, визначений за фактичною сумою накопичених пошкоджень, складає 15,35 років. Представлені результати комплексу випробувань модернізованого дослідного вагона-обкотишевоза моделі 20-9749 підтвердили ефективність запропонованих та впроваджених інноваційних конструктивних технічних рішень.

У роботі [17] визначено основні вектори подальшого розвитку вагонів-обкотишевозів наступних поколінь шляхом удосконалення існуючих типових та розробленні принципово нових моделей.

Аналіз існуючих літературних джерел засвідчив, що питанню комплексного аналізу технічних характеристик новостворених моделей бункерних вагонів для перевезення цементу не приділено достатньої уваги. Існуючі наукові праці за цим напрямком здебільшого стосуються розгляду конструктивних особливостей та результатів науково-експериментальних досліджень окремих новостворених моделей вагонів для перевезення цементу [2, 6]. Інші проаналізовані наукові праці містять комплексний аналіз технічних характеристик новостворених моделей вантажних вагонів, як то криті хопери-зерновози [2–5], вагони-думпкери магістрального та промислового призначення [7–9], вагони-платформи для перевезення великотоннажних контейнерів [10–13], вагон-хопер для перевезення сипких вантажів [14], вагони-хопери для перевезення для окатишів та агломерату [16, 17]. В деяких з проаналізованих праць запропоновано технічні вимоги до перспективних конструкцій вантажних вагонів нового покоління таких типів: криті вагони-зерновози [2–5], вагони-думпкери промислового призначення [8], вагони-думпкери магістрального призначення [9], піввагони з глухим кузовом [15], вагони-хопери для перевезення обкотишів та агломерату [17].

Таким чином, проведений аналіз літератури засвідчив, що хоча питання науково-експериментальних досліджень новостворених вагонів є предметом інтенсивних досліджень, питанню комплексного аналізу технічних характеристик новостворених вагонів для перевезення цементу приділено недостатню увагу. Отже, існує необхідність детально розглянути це питання з метою формування технічних вимог до інноваційних вагонів нового покоління для перевезення цементу.

Мета статті – виконати комплексний порівняльний аналіз технічних характеристик новостворених моделей бункерних вагонів для перевезення цементу та запропонувати технічні вимоги до інноваційних вагонів нового покоління цього типу.

У процесі досягнення поставленої мети пропонується вирішення таких задач:

– навести новостворені моделі бункерних вагонів вітчизняного виробництва для експлуатації магістральними коліями 1520 мм, що призначені для перевезення цементу;

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

- виконати порівняльний аналіз технічних характеристик новостворених моделей вагонів-цементовозів та сформулювати їх переваги порівняно з вагонами минулого покоління;
- провести аналіз результатів комплексних науково-експериментальних досліджень під час постановки на виробництво сучасних вагонів-цементовозів;
- розробити технічні вимоги до проєктування інноваційних бункерних вагонів нового покоління для перевезення цементу.

Матеріал та результати досліджень. За результатами виконання ДП «УкрНДІВ» науково-експериментальних досліджень, а також аналізу технічної документації від різних виробників, що надходила на погодження встановленим порядком, визначено новостворені моделі вантажних бункерних вагонів для перевезення цементу вітчизняного виробництва протягом останніх 15 років. До сучасних інноваційних новостворених бункерних вагонів для перевезення цементу слід віднести такі моделі: 19-7075, 19-7160 виробництва ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод»; 19-4142 – ТОВ «ТАС Дніпровагонмаш»; 19-9967, 17-1890 – ТОВ «ДМЗ «Карпати» ; 19-8530 – ТОВ «ДМЗ «Карпати» та ТОВ «Полтавський тепловозоремонтний завод». Зовнішній вигляд бункерних вагонів для перевезення цементу моделей 19-7075, 19-7160, 19-4142, 19-9967, 19-8530, 17-1890 зображено на рис. 2, їх технічні характеристики представлено в табл. 2.

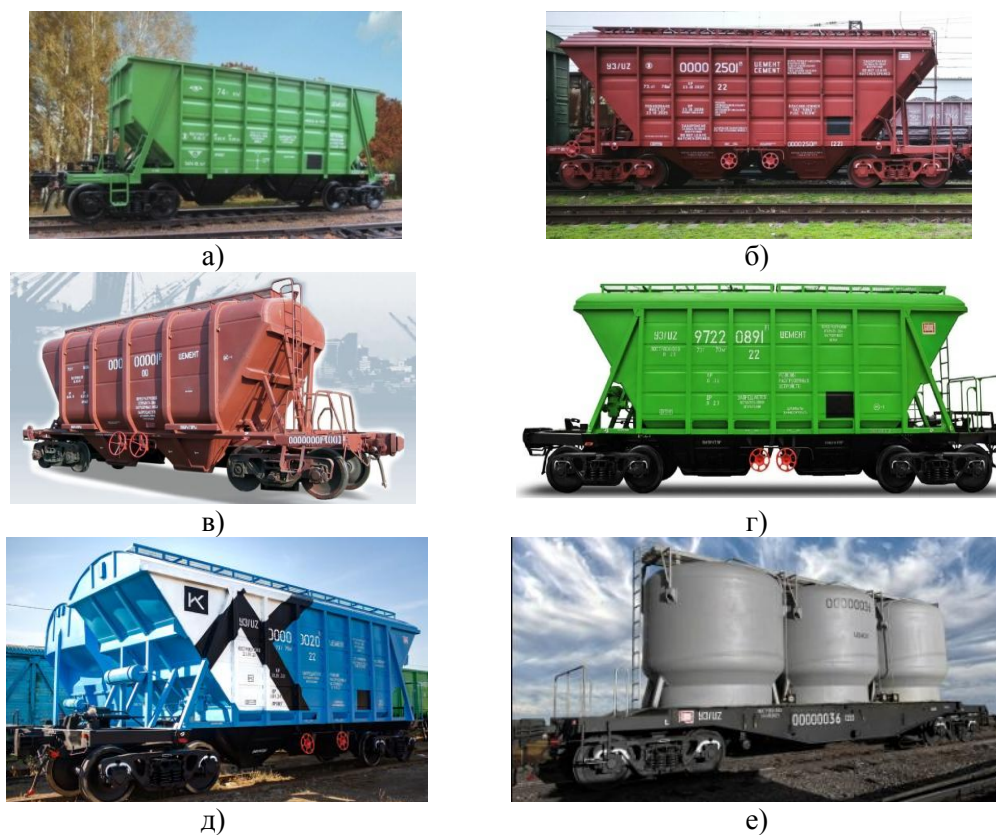


Рис. 2. Зовнішній вигляд інноваційних бункерних вагонів-цементовозів моделей:
а) 19-7075; б) 19-7160; в) 19-4142; г) 19-9967; д) 19-8530; е) 17-1890

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таблиця 2. – Технічні характеристики вагонів для перевезення цементу

Найменування характеристики	Найменування моделі та значення характеристики					
	19-7075	19-7160	19-4142	19-9967	19-8530	17-1890
Вантажопідйомність, т	74,0	73,5	73,0	73,0	73,0	67,0
Об'єм кузова, м ³	67,0	76,0	61,5	70,0	72,0	69,0
Маса тари вагона, т	20,0	20,5	21,0	21,0	21,0	27,0
Питома матеріалоемність	0,27	0,279	0,288	0,288	0,288	0,403
Питомий об'єм, м ³ /т	0,905	1,034	0,842	0,959	0,986	1,03
Матеріал кузова	09Г2, 09Г2С, 09Г2Д, 09Г2СД-12	09Г2, 09Г2С, 09Г2Д, 10СХНД 10Г2БД 10Г2ФД S355J2+N YQ450NQR1	09Г2, 09Г2С, 09Г2Д, 09Г2СД-12	09Г2, 09Г2С, 09Г2Д, 09Г2СД-12	09Г2, 09Г2С, 09Г2Д, 09Г2СД-12	09Г2, 09Г2С, 09Г2Д, 09Г2СД-12
Розрахункове навантаження від колісної пари на рейку, кН (тс)	230,5 (23,5)	230,5 (23,5)	230,5 (23,5)	230,5 (23,5)	230,5 (23,5)	230,5 (23,5)
Погонне навантаження, кН/м (тс/м)	77,5 (7,9)	77,5 (7,9)	76,72 (7,8)	78,2 (7,8)	76,72 (7,8)	63,8 (6,38)
Кількість люків, шт:						
завантажувальних	4	4	4	4	4	-
розвантажувальних	4	4	4	4	4	-
Ширина колії, мм	1520	1520	1520	1520	1520	1520
Конструкційна швидкість, км/год	120	120	120	120	120	120
База вагона, мм	7700	7700	7800	7800	7800	9720
Довжина по осях зчеплення, мм	11920	11920	12020	12020	12020	13940
Висота від рівня головки рейки, мм	4414	4650	4460	4475	4700	4750
Максимальна ширина, мм	3240	3240	3283	3260	3224	3200
Модель візка	18-7055	18-7055	18-100	18-100, 18-1750	18-1750, 18-7055	18-1750, 18-7055
Габарит	1-Т	1-ВМ	1-ВМ	1-ВМ	1-ВМ	1-Т
Нормативний строк служби, років	26	26	26	26	26	28
Рік початку серійного виробництва	2019	2026	2019	2013	2022	2023
Міжремонтний пробіг, км	210000	210000	210000	210000	210000	210000

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

До головних переваг зазначених моделей бункерних вагонів для перевезення цементу порівняно з вагонами-цементовозами минулого покоління (моделі 11-715, 19-758) слід віднести:

- підвищена вантажопідйомність та об'єм кузова;
- застосування в несучих конструкціях марок сталей підвищеної міцності, що дозволяє підвищити надійність роботи вагона в експлуатації;
- покращені ходові динамічні, гальмівні та інші експлуатаційні характеристики;
- удосконалення конструкції завантажувально-розвантажувальних пристроїв;
- підвищення пристосованості вагонів до комплексної механізації вантажно-розвантажувальних робіт і зниження важкої ручної праці під час виконання таких операцій;
- зниження матеріалоемності і трудомісткості виготовлення вагонів завдяки поліпшенню технологічності конструкції, застосування принципів модульної збірки, уніфікації вузлів і деталей;
- зниження коефіцієнта тари завдяки покращеній конструкції, застосування більш міцних і корозієстійких сталей, металічних сплавів;
- застосування сучасних технологій зварювання.

В рамках постановки на виробництво зазначені моделі вантажних вагонів для перевезення цементу пройшли комплекс науково-експериментальних досліджень, що включали статичні міцносні випробування, ходові динамічні та міцносні випробування, стаціонарні та поїзні гальмівні випробування, випробування з визначення рівня зовнішнього шуму та інші види випробувань.

За результатами аналізу результатів комплексу науково-експериментальних досліджень зазначених моделей вантажних вагонів для перевезення цементу встановлено таке:

1) статичних міцносних випробувань:

а) максимальні сумарні напруження в основних елементах конструкції від навантажень, які виникають під час ремонту та обслуговуванні вагонів:

- в режимі підйомки порожніх кузовів під кінці балки шворневої по діагоналі вагонів зафіксовані на нижній третині шворневої стійки, на торцевій стіні в лівій частині середнього поясу, на шворневій балці в зоні з'єднання з хребтовою балкою, на стійці шворневій, на балці боковій і становлять від 21,0 МПа до 242,7 МПа, що складає в межах (7–74) % від допустимих величин;

- в режимі підйомки завантажених кузовів під один кінець балки шворневої зафіксовані на нижній третині шворневої стійки, на шворневій стійці бокової стіни, на верхньому скосі торцевої стіни, на бункері, на балці боковій і становлять від 81,1 МПа до 272,6 МПа, що складає в межах (26–83) % від допустимих величин;

- в режимі підйомки завантажених кузовів під два кінці шворневої балки зафіксовані в нижній третині шворневої стійки, на верхньому скосі торцевої стіни; на стійці шворневій; на бункері; на балці боковій і становлять від 55 МПа до 279,2 МПа, що складає в межах (18–85) % від допустимих величин;

б) за I розрахунковим режимом максимальні сумарні напруження зафіксовані на шворневій балці в зоні з'єднання з вертикальною стійкою, на хребтовій балці в зоні з'єднання зі шворневою балкою, на шворневій балці в зоні з'єднання з підкосом торцевої стіни, на шворневій балці в зоні з'єднання з хребтовою балкою, на підкосі малому, на балці хребтовій зі сторони консольної частини вагона, на балці боковій і становлять від 178,0 МПа до 288,8 МПа, що складає в межах (46–97) % від допустимих величин;

в) за III розрахунковим режимом максимальні сумарні напруження зафіксовані на шворневій балці в зоні з'єднання з вертикальною стійкою, на торцевій стіні вагона, на лівому упорі у зоні з'єднання з поперечною балкою торцевої стіни, на шворневій балці в зоні з'єднання з хребтовою балкою, на балці хребтовій зі сторони консольної частини вагона, на балці боковій і становлять від 152,3 МПа до 207 МПа, що складає в межах (73–98) % від допустимих величин;

г) в режимі співударів поздовжніми нормативними силами максимальні сумарні напруження зафіксовані на хребтовій балці в зоні з'єднання з крайнім бункером, на нижній обв'язці, на хребтовій балці за шворневою балкою, на підкосі торцевої стіни, на торцевій стійці; на шворневій балці в зоні з'єднання з хребтовою балкою; на підкосі малому, на балці боковій і становлять від 202 МПа до 322 МПа, що складає в межах (59–98) % від допустимих величин;

2) ходових динамічних та міцносних випробувань:

а) мінімальні коефіцієнти стійкості від сходу колеса з рейки у порожньому стані знаходяться в межах від 1,31 до 1,78 та у завантаженому від 1,59 до 2,4 при допустимому не менше 1,3 ;

б) мінімальні коефіцієнти поперечної стійкості від перекидання при русі у кривих від дії бічних сил на зовнішню (внутрішню) сторону кривої у порожньому стані знаходяться в межах від 1,8 до 8,1 (від 1,8 до 10,1) при допустимому не менше 1,3 (1,2) та у завантаженому режимі від 2,1 до 7,1 (від 2,1 до 8,1) при допустимому не менше 1,3 (1,2);

в) максимальні коефіцієнти вертикальної динаміки кузова у порожньому стані знаходяться в межах від 0,22 до 0,59 при допустимому не більше ніж 0,75 та у завантаженому режимі від 0,16 до 0,33 при допустимому не більше ніж 0,65;

г) максимальні коефіцієнти вертикальної динаміки необресореної рами візка у порожньому стані знаходяться в межах від 0,4 до 0,73 при допустимому не більше ніж 0,9 та у завантаженому режимі від 0,21 до 0,23 при допустимому не більше ніж 0,85;

д) максимальні коефіцієнти горизонтальної динаміки у порожньому стані знаходяться в межах від 0,1 до 0,34 при допустимому не більше ніж 0,4 та у завантаженому від 0,05 до 0,19 при допустимому не більше ніж 0,38;

е) максимальні прискорення кузова у вертикальній площині вагона у порожньому стані знаходяться в межах від 0,23 до 0,53 при допустимому не більше ніж 0,75 та у завантаженому від 0,15 до 0,19 при допустимому не більше ніж 0,65;

є) максимальні прискорення кузова у горизонтальній площині вагона у порожньому стані знаходяться в межах від 0,21 до 0,42 при допустимому не більше ніж 0,55 та у завантаженому від 0,14 до 0,29 при допустимому не більше ніж 0,45;

ж) мінімальні коефіцієнти запасу опору втомі зафіксовані на підкосі торцевої стіни, шворневій балці, верхній центральній частині торцевої стіни, балці хребтовій у зоні з'єднання із балкою шворневою, бункері та знаходяться в межах від 1,6 до 2,78 при допустимому не менше ніж 1,5;

3) стаціонарних гальмівних випробувань

а) розрахункові гальмівні коефіцієнти при повномірних та зношених композиційних колодках у порожньому стані вагона знаходяться в межах від 0,25 до 0,39 при допустимому не менше ніж 0,22 та у завантаженому від 0,141 до 0,172 при допустимому не менше ніж 0,14;

б) мінімально допустимі по ефективності гальмування значення розрахункових сил натиснення повномірних та зношених чавунних гальмівних колодок у порож-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

ньому стані вагона знаходяться в межах від 3,6 до 4,3 при допустимому не менше ніж 3,5 та у завантаженому від 6,7 до 7,7 при допустимому не менше ніж 6,5;

в) тиск повітря в гальмівному циліндрі при композиційних колодках у порожньому стані вагона знаходиться в межах від 1,4 кгс/см² до 1,5 кгс/см² при допустимому (1,2-1,6) кгс/см² та у завантаженому від 3,1 кгс/см² до 3,3 кгс/см² при допустимому (3,0-3,4) кгс/см²;

г) тиск повітря в гальмівному циліндрі при чавунних колодках у порожньому стані вагона знаходиться в межах від 1,7 кгс/см² до 1,8 кгс/см² при допустимому (1,4-2,0) кгс/см² та у завантаженому від 4,1 кгс/см² до 4,2 кгс/см² при допустимому (4,0-4,5) кгс/см²;

д) вихід штока гальмівного циліндра при композиційних колодках у порожньому стані вагона знаходиться в межах від 35 мм до 78 мм та у завантаженому від 58 мм до 91 мм при допустимому (25-65) мм та (50-100) мм залежно від типу конструкції гальмівної системи;

е) вихід штока гальмівного циліндра при чавунних колодках у порожньому стані вагона знаходиться в межах від 55 мм до 79 мм та у завантаженому від 80 мм до 108 мм при допустимому (30-90) мм та (75-125) мм залежно від типу конструкції гальмівної системи;

є) стоянкове гальмо забезпечує утримання вагона з повним розрахунковим завантаженням на ухилах в межах від 30,4 ‰ до 39,0 ‰ при допустимому не менше ніж 30 ‰.

4) поїзних гальмівних випробувань

а) гальмівний шлях поїзда при швидкості на початку гальмування 80 км/год навантаженого вагона на ухилі 6 ‰ знаходиться в межах від 872 м до 953 м при допустимому не більше ніж 1000 м;

б) гальмівний шлях поїзда при швидкості на початку гальмування 90 км/год навантаженого вагона на ухилі 6 ‰ знаходиться в межах від 1083 м до 1220 м при допустимому не більше ніж 1300 м;

в) гальмівний шлях поїзда при швидкості на початку гальмування 80 км/год навантаженого вагона на ухилі 10 ‰ знаходиться в межах від 976 м до 1079 м при допустимому не більше ніж 1200 м;

г) гальмівний шлях поїзда при швидкості на початку гальмування 90 км/год навантаженого вагона на ухилі 10 ‰ знаходиться в межах від 1201 м до 1389 м при допустимому не більше ніж 1500 м;

д) гальмівний шлях поїзда при швидкості на початку гальмування 100 км/год навантаженого вагона на ухилі 6 ‰ знаходиться в межах від 1366 м до 1520 м при допустимому не більше ніж 1600 м;

е) гальмівний шлях при швидкості на початку гальмування 120 км/год навантаженого вагона (поїзда) на рівній площадці знаходиться в межах від 1406 м до 1669 м (від 1506 м до 1836 м);

5) випробувань з визначення рівня зовнішнього шуму

максимальні рівні зовнішнього шуму на відстані 25 м від осі колії під час руху одиночного вагона в порожньому стані з локомотивом, що рухається в режимі вибігу зі швидкістю 80 км/год знаходяться в межах від 83,1 дБА до 84,5 дБА при допустимому не більше ніж 86 дБА.

Порівняльний аналіз технічних характеристик та результатів комплексу науково-експериментальних досліджень сучасних моделей вантажних вагонів для пере-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

везення цементу дозволив запропонувати встановити такі вимоги до проектування цього типу вантажних вагонів наступного покоління (табл. 3).

Таблиця 3. – Основні вимоги до технічних характеристик інноваційних вагонів наступного покоління для перевезення цементу

№ п/п	Найменування параметру (характеристики)	Вимоги до показника (характеристики)
1	2	3
Загальні вимоги		
1	Навантаження на вісь, тс	23,5 (25,0)
2	Максимальна експлуатаційна швидкість руху, км/год	120
3	Питома матеріалоемність – для вагонів-цементовозів з гравітаційним завантаженням через верхні люки та розвантаженням у міжрейковий простір через нижні люки; – для вагонів-цементовозів з пневматичним завантаженням та розвантаженням	$\leq 0,27$ $\leq 0,4$
4	Питомий об'єм, м ³ /т	$\geq 0,9$
5	Габарит	1-ВМ або 1-Т
Вимоги до показників безпеки та впливу на навколишнє середовище		
6	Коефіцієнт запасу стійкості колеса від сходу з рейки	$\geq 1,4$
7	Коефіцієнт запасу поперечної стійкості від перекидання під дією бічних сил – на зовнішню сторону кривої; – на внутрішню сторону кривої	$\geq 1,8$ $\geq 1,8$
8	Рівень зовнішнього шуму під час руху зі швидкістю 80 км/год на відстані 25 м від осі колії, дБА	≤ 85
Вимоги до показників динаміки та плавності руху вагона		
9	Коефіцієнт вертикальної динаміки кузова – у порожньому стані; – у завантаженому стані	$\leq 0,6$ $\leq 0,5$
10	Коефіцієнт вертикальної динаміки необресореної рами візка – у порожньому стані; – у завантаженому стані	$\leq 0,7$ $\leq 0,6$
11	Коефіцієнт горизонтальної динаміки – у порожньому стані; – у завантаженому стані	$\leq 0,3$ $\leq 0,25$
12	Прискорення кузова вертикальні у долях g – у порожньому стані; – у завантаженому стані	$\leq 0,5$ $\leq 0,3$
13	Прискорення кузова горизонтальні у долях g – у порожньому стані; – у завантаженому стані	$\leq 0,4$ $\leq 0,25$

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Продовження таблиці 3

№ п/п	Найменування параметру (характеристики)	Вимоги до показника (характеристики)
1	2	3
Вимоги до показників впливу вагона на верхню будову залізничної колії		
14	Динамічні напруження розтягнення в кромках підшви рейки в кривих і прямих ділянках залізничної колії, у передньому вильоті рамних рейок і перевідних кривих стрілочних переводів, МПа	≤ 240
15	Напруження розтягнення у зовнішніх кромках підшов вістряків та осердя хрестовини з рухомими елементами, МПа	≤ 275
16	Бічні сили, які передаються від колеса на рейку, за умови міцності рейкових скріплень, кН	≤ 100
17	Динамічне вертикальне навантаження від колеса на рейку, кН	≤ 210
18	Динамічне погонне навантаження на залізничну колію від візка, кН/м	≤ 168
19	Напруження на основній площадці земляного полотна, МПа	$\leq 0,08$
Вимоги до ресурсу, надійності, міцності вагона та його комплектуючих		
20	Коефіцієнт запасу опору втомі елементів несної конструкції та кузова вагона	$\geq 1,7$
21	Коефіцієнт запасу втомної міцності бокової рами та балки надресорної	$\geq 2,0$
22	Призначений (нормативний) строк служби (експлуатації), років – всього; – до першого капітального ремонту	32 16
23	Інтенсивність зносу колеса (застосування колеса з економічно-вигідним профілем), мм/10 ⁴ км	$\geq 0,2$
24	Застосування центрального підвішування з нелінійною характеристикою, в якому ресурс витих пружин без зламів, циклів	$6 \cdot 10^6$
25	Застосування колесоощадних колодок з пробігом, млн. км	$\geq 0,36$
26	Міцність сталі, з якої повинні виготовлятися основні несучі елементи кузова вагона, МПа – хребтова балка (за наявності); – шворневі та проміжні балки; – елементи бокових і торцевих стін, бункери, розкоси; – обшиви бокових і торцевих стін	≥ 355 ≥ 345 ≥ 325 ≥ 295

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Продовження таблиці 3

№ п/п	Найменування параметру (характеристики)	Вимоги до показника (характеристики)
1	2	3
Вимоги до гальмівної системи		
27	Гальмівний коефіцієнт а) композиційні колодки – у порожньому стані; – у завантаженому стані; б) чавунні колодки – у порожньому стані; – у завантаженому стані;	$\geq 0,22$ $\geq 0,14$ $\geq 3,5$ $\geq 6,5$
28	Тиск повітря у гальмівному циліндрі а) композиційні колодки – у порожньому стані; – у завантаженому стані; б) чавунні колодки – у порожньому стані; – у завантаженому стані;	1,2–1,4 3,0–3,4 1,4–2,0 4,0–4,5
29	Вихід штока гальмівного циліндра, мм а) композиційні колодки залежно від конструктивного виконання гальмівної системи згідно вимог СТП 03.01-001:2023 б) чавунні колодки	25–65 25–75 50–100 75–125
30	Можливість утримання вагона у завантаженому стані стоянковим гальмом на ухилі, ‰	30
31	Гальмівний шлях на ухилі 6‰, м – зі швидкості початку гальмування 80 км/год; – зі швидкості початку гальмування 90 км/год; – зі швидкості початку гальмування 100 км/год;	≤ 1000 ≤ 1300 ≤ 1600
32	Гальмівний шлях на ухилі 10‰, м – зі швидкості початку гальмування 80 км/год; – зі швидкості початку гальмування 90 км/год;	≤ 1200 ≤ 1500
33	Гальмівний шлях на рівній площадці зі швидкості початку гальмування 120 км/год, м – завантаженого вагона; – завантаженого поїзда	≤ 1700 ≤ 2000
Вимоги до міжремонтних інтервалів вагона та ресурсу його комплектуючих		
34	Міжремонтний пробіг до першого деповського ремонту вагона після побудови, тис. км (років)	500 (5)
35	Міжремонтний пробіг між наступними деповськими ремонтами, тис. км (років)	360 (4)
36	Підшипники касетного типу для буксових вузлів з адаптером, що забезпечують безремонтний пробіг, млн. км (років)	$\geq 1,0$ (16)

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Закінчення таблиці 3

№ п/п	Найменування параметру (характеристики)	Вимоги до показника (характеристики)
1	2	3
37	Пробіг буксових вузлів, що забезпечують безремонтний пробіг колісних пар, млн. км (років)	$\geq 0,8$ (8)
38	Пробіг по зносу металевих частин пружних ковзунів, фрикційних планок та клинів, млн. км	$\geq 1,0$
39	Пробіг по зносу вузла п'ятник-підп'ятник, млн. км	$\geq 0,5$
40	Пробіг до заміни втулки, млн. км – гальмівної важільної передачі – підвищування гальмівного башмака	$\geq 1,0$ $\geq 0,36$

Слід зазначити, що запропоновані технічні вимоги до проектування бункерних вагонів нового покоління для перевезення цементу, окрім порівняльного аналізу результатів науково-експериментальних досліджень сучасних моделей, враховують наступні нормативні та рекомендаційні вимоги [18–23].

Висновки.

1. Комплексний порівняльний аналіз технічних характеристик новостворених бункерних вагонів для перевезення цементу дозволив сформулювати головні переваги зазначених моделей вагонів порівняно з вагонами-цементовозами минулого покоління.

2. Проведений порівняльний аналіз результатів науково-експериментальних досліджень в рамках постановки на виробництво різними підприємствами новостворених моделей бункерних вагонів для перевезення цементу, а також існуючі нормативні та вимоги рекомендаційного характеру, дозволили запропонувати технічні вимоги до проектування бункерних вагонів для перевезення цементу нового покоління. У зв'язку зі скасуванням значного обсягу нормативних документів у сфері залізничного транспорту протягом останнього періоду, у тому числі ДСТУ 3435-96 «Вагони-хопери криті колії 1520 мм для перевезення цементу. Загальні технічні умови» [24], запропоновані вимоги можуть стати базою для створення нормативного документа, який буде встановлювати технічні вимоги до проектування бункерних вагонів нового покоління для перевезення цементу.

3. Отримані результати науково-експериментальних досліджень показали можливі перспективні шляхи розвитку бункерних вагонів для перевезення цементу та можуть стати основою для створення нових моделей або для виконання конструктивного вдосконалення існуючим моделям вагонів-цементовозів.

Рекомендації.

Представлені у статті матеріали мають практичну цінність та мають стати у нагоді інженерно-технічному персоналу, вагонобудівним та вагоноремонтним підприємствам під час створення нових моделей бункерних вагонів для перевезення цементу чи глибокій модернізації існуючих, а також підвищення ефективності їх експлуатації.

Результати проведеного розгляду сучасного стану конструктивної досконалості вагонів-цементовозів обґрунтували необхідність виконання відповідних науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт на розроблення їх зразків нового покоління, що безпосередньо пов'язано із застосуванням нових концептів під час їх проєктування. Для розробки інноваційних конкурентоспроможних бункерних вагонів для перевезення цементу рекомендуємо вагонобудівним заводам на практиці розробити та реалізувати оптимальні конструкторські рішення відповідно до запропонованих технічних вимог з урахуванням розвитку сучасних технологій і нової техніки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сулим А.О., Сафронов О.М., Федосов-Ніконов Д.В., Стринжа А.М. Сучасний стан та перспективи розвитку парку вантажних вагонів в Україні: оновлення або продовження призначеного строку служби? *Залізничний транспорт України*. 2021. № 4. С. 4–20. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2021-141-4-04-20>
2. Панченко С.В., Мартинов І.Е., Можейко Є.Р., Сафронов О.М., Труфанова А.В. Криті вагони / С.В. Панченко, І.Е. Мартинов, Є.Р. Можейко, О.М. Сафронов, А.В. Труфанова. Кременчук, Харків: УкрНДІВ, УкрДУЗТ, 2021. 161 с.
3. Фомін О.В., Мурашова Н.Г., Воропай В.С. Конструктивний аналіз та перспективи розвитку бункерних вагонів для перевезення зернових. *Вагонний парк*. 2018. № 10 (142). С. 17–21.
4. Фомін О.В., Мурашова Н.Г., Воропай В.С., Коваленко В.В. Сучасний стан конструктивної досконалості бункерних вагонів для перевезення зернових та перспективи його розвитку. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. Маріуполь, 2017. Вип. 34. С. 192–201. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/242048>
5. Сулим А.О., Сафронов О.М., Хозя П.О., Фомін О.В., Фомін В.В. Сучасні інноваційні бункерні вагони-хопери вітчизняного виробництва та перспективи їх розвитку. *Наукові вісті Дніпровського університету*. 2021. № 21. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-16>
6. Сулим А.О., Орлов О.В., Столетов С.О., Федорак І.І. Експериментальні дослідження міцності конструкції та ходових якостей вагона для цементу бункерного типу. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*. Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2024. Вип. 28. С. 7–21. DOI: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2024-28-7-21>
7. Хозя П.О., Юшко О.О., Орлов О.В., Хвоєнко Є.О., Григорошенко М.В. Науково-експериментальні дослідження технічних характеристик вагона-самоскида моделі 33-7141. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*. Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2022. Вип. 25. С. 129–143. DOI: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2022-25-129-143>
8. Сулим А.О., Стринжа А.М., Бородай О.О., Федоров В.В. Технічні характеристики та шляхи удосконалення вагонів-думпкарів для промислового транспорту. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*. Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2021. Вип. 23. С. 54–73. DOI: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2021-23-54-73>
9. Сулим А.О., Хозя П.О., Стринжа А.М., Речкалов В.С., Федоров В.В. Шляхи та перспективи удосконалення вагонів-думпкарів, призначених для експлуатації магістральними коліями 1520 мм. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія: «Транспортні системи і технології»*. 2022. Вип. 39. С. 51–65. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-6>
10. Федорак І.І., Сулим А.О., Хозя П.О., Столетов С.О. Експериментальні дослідження вагона-платформи моделі 13-1894 для великотоннажних контейнерів. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*. Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2024. Вип. 29. С. 81–93. DOI: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2024-29-81-93>
11. Костиця С.А., Федоров С.Ф., Болотов В.В., Грановська Н.Й. Ходові динамічні та міцнісні випробування вагона-платформи для великотоннажних контейнерів моделі 13-7133 на візках з ковзунами зазорного типу для перевезення крупнотонажних контейнерів. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : матеріали 81 Міжнародної науково-практичної конференції, 22-23 квітня 2021 р. / за заг. ред. А.В. Радкевича, Р.В. Рибалки*. Дніпров. нац. ун-т. залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпро, 2021. С. 307–308.
12. Рейдемейстер О.Г., Шикунів О.А., Ягода Д.О. Експериментальні дослідження технічних характеристик вагона-платформи моделі 13-4155. *2-а Міжнародна науково-технічна конференція «Про-*

гресивні технології засобів транспорту». Харків, 05-06 грудня.: Тези доповідей. Харків: УкрДУЗТ, 2024. С. 76–77.

13. Крамаренко М.В., Гречкін О.А., Плютін О.І., Єгоров Д.О. Створення першого вітчизняного вантажного вагона для колії 1435 мм за вимогами TSI. *Залізничний транспорт України*. 2024. № 3. С. 4–14. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2024-152-3-04-14>

14. Гречкін О.А., Єгоров Д.О. Створення вантажного вагону для перевезення сипких вантажів моделі 19-7154. *Залізничний транспорт України*. 2024. № 4. С. 4–9. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2024-153-4-04-09>

15. Візник Р.І. Конструктивні особливості піввагона з глухим кузовом нового покоління. *2-а Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні технології засобів транспорту»*. Харків, 05-06 грудня.: Тези доповідей. Харків: УкрДУЗТ, 2024. С. 110–112.

16. Фомін О.В., Сапронова С.Ю., Кочешкова Н.С., Фомін В.В. Аналіз випробувань модернізованих спеціалізованих вагонів-хоперів для окатишів та агломерату моделі 20-9749. *Вісник національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. Київ, НТУ, 2017. Вип. 1 (37). С. 392–401.

17. Сулим А.О., Стринжа А.М., Семко Ж.О., Федоров В.В. Аналіз технічних показників та надійності комплектуючих деталей вагонів-окатишевозів. *Матеріали конференції: II Міжнародна науково-практична «Актуальні проблеми і перспективи інноваційного розвитку економіки та техніки в умовах інтеграції України в Європейський науково-виробничий простір, 9 червня 2022 р. Кременчук, ДП «УкрНДІВ»*, 2022. С. 43–46.

18. ДСТУ 7571:2014 Рухомий склад залізниць. Норми допустимого впливу на залізничну колію шириною 1520 мм. Введено вперше на підставі наказу Мінекономрозвитку України від 02.12.2014 № 1429. Київ, Мінекономрозвитку, 2015. 15 с.

19. ДСТУ 7598:2014 Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Введено на підставі наказу ДП «УкрНДІВ» від 02.12.2014 № 1430. Київ, ДП «УкрНДІВ», 2014. 161 с.

20. Протокол засідання Технічної ради Укрзалізниці від 30 вересня 2015 року. 16 с.

21. Протокол № ЦТех-2/21 від 30.06.2017 р. засідання секції «Єдиної технічної політики та екологічного менеджменту» науково-технічної ради ПАТ «Укрзаліниця». 9 с.

22. СТП 03.01-001:2023. Вагони вантажні. Ремонт гальмівного обладнання. Правила виконання. Введено вперше на підставі протоколу АТ «Укрзаліниця» від 10.04.2023 № Ц-85/20 Ком.т. Київ, АТ «Укрзаліниця», 2023. 205 с.

23. ЦШ-0001. Інструкція з сигналізації на залізницях України. Введено вперше на підставі наказу Міністерства транспорту та зв'язку України від 23.06.2008 № 747. Київ, Мінтрансзв'язку, 2008. 82 с.

24. ДСТУ 3435-96. Вагони-хопери закриті колії 1520 мм для перевезення цементу. Загальні технічні умови. [Чинний від 1999-01-01 до 2025-12-31]. Київ, Держстандарт України, 1996. 10 с.

A. O. Sulym

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,

33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine

Tel.: +380536660354, E-mail: sulim1.ua@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8144-8971>

I. I. Fedorak

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,

33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine

Tel.: +380536661257, E-mail: ivigfed@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4503-1858>

V. O. Shushmarchenko

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»

33 I. Prykhodka Street, Kremenchuk, Poltava Region, 39621, Ukraine

Tel.: +380536661384, E-mail: vasylkremen77@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7580-8501>

O. O. Borodai

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»
33 I. Prykhodka Street, Kremenchuk, Poltava Region, 39621, Ukraine
Tel.: +380536661384, E-mail: saleksbor@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8677-5776>

ANALYSIS OF THE TECHNICAL CHARACTERISTICS OF HOPPER WAGONS FOR TRANSPORTING CEMENT

The article analyses existing research on the creation of hopper wagons for transporting cement and justifies the need for a comprehensive analysis of the technical characteristics of newly developed models of hopper wagons for transporting cement. It has been established that the operational fleet of cement wagons consists mainly of hopper wagons of models 11-715 and 19-758 manufactured by Kryukovsky Railway Car Building Works, PJSC between 1980 and 1995. The need to renew the domestic freight fleet with newly developed wagons for transporting cement has been identified.

It has been established that over the past fifteen years, domestic car-building plants have created at least six new models of hopper wagons for transporting cement with improved technical and operational characteristics: 19-7075, 19-7160 manufactured by Kryukovsky Railway Car Building Works, PJSC; 19-4142 – TAS Dniprovagonmash LLC; 19-9967, 17-1890 – DMZ Karpaty LLC; 19-8530 – DMZ Karpaty LLC and Poltava Diesel Locomotive Repair Plant LLC. A comparison of the technical characteristics of these newly developed models of hopper cars for transporting cement was performed.

The results of comprehensive scientific and experimental studies of newly developed models of hopper wagons for transporting cement within the framework of their production launch were analyzed, including static strength tests, dynamic and strength tests, stationary and train tests, tests to determine the level of external noise, and other types of tests.

The scientific novelty was to develop requirements for the technical characteristics of innovative next-generation wagons for transporting cement, taking into account the analysis of the results of scientific and experimental research on modern newly developed models of this type of wagon.

The practical significance lies in the possibility of using the research results obtained in this article to create a regulatory document that will establish general technical requirements for the design of innovative hopper cars for transporting cement. The results of this work may also be useful in the creation of new models of hopper cars for transporting cement or in the thorough modernisation of existing ones, as well as in improving their operational efficiency.

Based on the results of the research, conclusions have been formulated and recommendations have been made regarding the possible further use of the data obtained.

Keywords: hopper wagon, railway cement car, braking system, railway track, strength, service life, running performance, noise.

REFERENCES

1. Sulym, A.O., Safronov, O.M., Fedosov-Nikonov, D.V., & Strynzha A.M. (2021). Suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku parku vantazhnykh vahoniv v Ukraini: onovlennia abo prodovzhennia pryznachenoho stroku sluzhby? [Current state and prospects for the development of the freight car fleet in Ukraine: renewal

- or extension of the designated service life?] *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 4, 4–20. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2021-141-4-04-20> [in Ukrainian]
2. Panchenko, S.V., Martynov, I.E., Mozheiko, Ye.R., Safronov, O.M., & Trufanova, A.V. (2021). *Kryti vahony [Covered wagons]*. Kremenchuk, Kharkiv: UkrNDIV, UkrDUZT [in Ukrainian]
3. Fomin, O.V., Murashova, N.G., & Voropai, V.S. (2018). Konstruktyvnyi analiz ta perspektyvy rozvytku bunkernykh vahoniv dlia perevezennia zernovykh. [Structural analysis and prospects for the development of hopper cars for grain transportation]. *Vahonnyi park – Railcar Fleet*, 10 (142), 17–21 [in Ukrainian]
4. Fomin, O.V., Murashova, N.H., Voropai V.S., & Kovalenko V.V. (2017). Suchasnyi stan konstruktyvnoi doskonalosti bunkernykh vahoniv dlia perevezennia zernovykh ta perspektyvy yoho rozvytku. [Current state of design perfection of hopper cars for grain transportation and prospects for its development]. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Bulletin of the Priazovsk State Technical University. Series: Technical Sciences*, 34, 192–201. Mariupol. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/242048> [in Ukrainian]
5. Sulym, A.O., Safronov, O.M., Khozia, P.O., Fomin, O.V., & Fomin, V.V. (2021). Suchasni innovatsiini bunkerni vahony-khopery vitchyznianoho vyrobnytstva ta perspektyvy yikh rozvytku. [Modern innovative hopper cars of domestic production and prospects for their development]. *Naukovi visti Dalivskoho universytetu – Scientific News of Dahl University*, 21. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-16> [in Ukrainian]
6. Sulym, A.O., Orlov, O.V., Stoliyetov, S.O., & Fedorak I.I. (2024). Eksperymentalni doslidzhennia mitsnosti konstrukttsii ta khodovykh yakosti vahona dlia tseментu bunkernoho typu. [Experimental studies of the structural strength and running characteristics of a bunker-type cement wagon]. *Zbirnyk naukovykh prats «Reikovy rukhomiy sklad» – Collection of scientific papers ‘Railbound Rolling Stock’*, 28, 7–21. Kremenchuk: SE «UkrNDIV». DOI: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2024-28-7-21> [in Ukrainian]
7. Khozia, P.O., Yushko, O.O., Orlov, O.V., Khvoienko, E.O., & Hrygoroshenko, M.V. (2022). Naukovo-eksperymentalni doslidzhennia tekhnichnykh kharakterystyk vahona-samoskyda modeli 33-7141. [Scientific and experimental research on the technical characteristics of the 33-7141 model dump car]. *Zbirnyk naukovykh prats «Reikovy rukhomiy sklad» – Collection of scientific papers ‘Railbound Rolling Stock’*, 25, 129–143. Kremenchuk: SE «UkrNDIV». DOI: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2022-25-129-143> [in Ukrainian]
8. Sulym, A.O., Strynzha, A.M., Borodai, O.O., & Fedorov, V.V. (2021). Tekhnichni kharakterystyky ta shliakhy udoskonalennia vahoniv-dumpkariv dlia promyslovoho transportu. [Technical characteristics and ways to improve dump cars for industrial transport]. *Zbirnyk naukovykh prats «Reikovy rukhomiy sklad» – Collection of scientific papers ‘Railbound Rolling Stock’*, 23, 54–73. Kremenchuk: SE «UkrNDIV». DOI: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2021-23-54-73> [in Ukrainian]
9. Sulym, A.O., Khozia, P.O., Strynzha, A.M., Rechkalov, V.S., & Fedorov, V.V. (2022). Shliakhy ta perspektyvy udoskonalennia vahoniv-dumpkariv, pryznachenykh dlia ekspluatatsii mahistralnykh koliiamy 1520 mm [Ways and prospects for improving dump cars designed for operation on 1520 mm main lines]. *Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Seriya: «Transportni systemy i tekhnologii» – Collection of scientific works of DUIT. Series: ‘Transport Systems and Technologies’*, 39, 51–65. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-6> [in Ukrainian]
10. Fedorak, I.I., Sulym, A.O., Khozia, P.O., & Stoliyetov, S.O. (2024). Eksperymentalni doslidzhennia vahona-platformy modeli 13-1894 dlia velykotonnazhnykh konteineriv. [Experimental studies of the 13-1894 model flatcar for large-tonnage containers]. *Zbirnyk naukovykh prats «Reikovy rukhomiy sklad» – Collection of scientific papers ‘Railbound Rolling Stock’*, 29, 81–93. Kremenchuk: SE «UkrNDIV». DOI: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2024-29-81-93> [in Ukrainian]
11. Kostyrsia, S.A., Fedorov, E.F., Bolotov, V.V., & Hranovskaia, N.Y. (2021). Khodovi dynamichni ta mitsnosni vyprovuvannia vahona-platformy dlia velykotonnazhnykh konteineriv modeli 13-7133 na vizkakh z kovzunamy zazornoho typu dlia perevezennia krupnotonnazhnykh konteineriv. Problemy ta perspektyvy rozvytku za-liznychnoho transportu. [Running dynamic and strength tests of a flatcar for large-tonnage containers, model 13-7133, on bogies with gap-type skids for transporting large-tonnage containers. Problems and prospects for the development of railway transport]. *Proceedings from 81 Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii – The 81st International Scientific and Practical Conference*. A.V. Radkevich, R.V. Rybalko (Eds.). (pp. 76–77). Dniprovskiy natsionalnyi universytet zaliznychoho transportu imeni akademika V. Lazariana – Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazarian. Dnipro [in Ukrainian].
12. Reidemeister, O.H., Shykunov, O.A., & Yahoda, D.O. (2024). Eksperymentalni doslidzhennia tekhnichnykh kharakterystyk vahona-platformy modeli 13-4155. [Experimental studies of the technical characteristics of the 13-4155 model flatcar]. *Proceedings from 2-a Mizhnarodna naukovo-tekhnichna*

konferentsiia «Prohresyvni tekhnolohii zasobiv transportu» – The 2nd International Scientific and Technical Conference 'Progressive Technologies for Transport'. Kharkiv: UkrDUZT [in Ukrainian].

13. Kramarenko, M.V., Hrechkin, O.A., Pliutin, O.I., & Yehorov, D.O. (2024). Stvorennia pershoho vitchyznianoho vantazhnoho vahona dlia kolii 1435 mm za vymohamy TSI [Construction of the first domestic freight wagon for 1435 mm gauge in accordance with TSI requirements]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 3, 4–14. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2024-152-3-04-14> [in Ukrainian].

14. Hrechkin, O.A., & Yehorov, D.O. (2024). Construction of a freight car for transporting bulk cargo, model 19-7154 [Stvorennia vantazhnoho vahonu dlia perevezennia sypkykh vantazhiv modeli 19-7154]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 4, 4–9. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2024-153-4-04-09> [in Ukrainian].

15. Vizniak, R.I. (2024). Konstruktyvni osoblyvosti pivvahona z hlukhym kuzovom novoho pokolinnia [Design features of a new generation flat car with a closed body]. *Proceedings from 2-a Mizhnarodna naukovo-tekhnicna konferentsiia «Prohresyvni tekhnolohii zasobiv transportu» – The 2nd International Scientific and Technical Conference 'Advanced Transport Technologies'.* (pp. 110–112). Kharkiv: UkrDUZT [in Ukrainian].

16. Fomin, O.V., Saponova, S.Yu., Kocheshkova, N.S., & Fomin, V.V. (2017). Analiz vyprobuvan modernizovanykh spetsializovanykh vahoniv-khoperiv dlia okatyshiv ta ahlomeratu modeli 20-9749. [Analysis of tests of modernised specialised hopper wagons for pellets and sinter, model 20-9749]. *Visnyk natsionalnoho transportnoho universytetu. Seriya «Tekhnichni nauky» – Bulletin of the National Transport University. Series 'Technical Sciences'*, 1 (37), 392–401. Kyiv: NTU [in Ukrainian].

17. Sulym, A.O., Strynzha, A.M., Semko, Zh.O., & Fedorov, V.V. (2022). Analiz tekhnichnykh pokaznykiv ta nadiinosti komplektuiuchykh detalei vahoniv-okatyshhevoziv [Analysis of technical indicators and reliability of components of pellet wagons]. *Proceedings from II Mizhnarodna naukovo-praktychna «Aktualni problemy i perspektyvy innovatsiinoho rozvytku ekonomiky ta tekhniky v umovakh intehtatsii Ukrainy v Yevropeyskyi naukovo-vyrobnychiy prostir – The Second International Scientific and Practical Conference 'Current Problems and Prospects for Innovative Development of the Economy and Technology in the Context of Ukraine's Integration into the European Scientific and Industrial Space'.* (pp. 43–46). Kremenchuk: SE «UkrNDIV» [in Ukrainian].

18. Rukhomyi sklad zaliznyts. Normy dopustymoho vplyvu na zaliznychnu koliiu shyrynoi 1520 mm [Rolling stock of railways. Permissible impact standards on 1520 mm gauge railway tracks]. (2015). *DSTU 7571:2014 from 2nd December 2014*. Kyiv: Ministry of Economic Development [in Ukrainian].

19. Rukhomyi sklad zaliznyts. Normy dopustymoho vplyvu na zaliznychnu koliiu shyrynoi 1520 mm [Freight wagons. General requirements for calculations and design of new and modernised 1520 mm gauge wagons (non-self-propelled)]. (2014). *DSTU 7598:2014 from 2nd December 2014*. Kyiv: SE «UkrNDNC» [in Ukrainian].

20. Protokol zasidannia Tekhnichnoi rady Ukrzaliznytsi [Minutes of the meeting of the Technical Council of Ukrzaliznytsia] (2015, 30 September) [in Ukrainian].

21. Protokol № TsTsTekh-2/21 zasidannia sekti «Iedynoi tekhnichnoi polityky ta ekolohichnoho menedzhmentu» naukovo-tekhichnoi rady PAT «Ukrzaliznytsia» [Minutes No. TsTsTech-2/21 of the meeting of the section «Unified Technical Policy and Environmental Management» of the Scientific and Technical Council of PJSC Ukrzaliznytsia] (2017, 30 June) [in Ukrainian].

22. Vahony vantazhni. Remont halmivnoho obladnannia. Pravyla vykonannia [Freight cars. Repair of braking equipment. Rules of execution]. (2023). *STP 03.01-001:2023*. (2023, 10 April). Kyiv: JSC Ukrzaliznytsia [in Ukrainian].

23. Instruksiiia z syhnalizatsii na zaliznytsiakh Ukrainy [Instructions for signalling on Ukrainian railways]. (2008). *TSSh-0001*. (2008, 23 June). Kyiv: Ministry of Transport and Communications [in Ukrainian].

24. Vahony-khoperi zakryti kolii 1520 mm dlia perevezennia tsementu. Zahalni tekhnichni umovy [Closed hopper wagons with a track gauge of 1520 mm for transporting cement. General technical conditions]. (1996). *DSTU 3435-96* [Valid from 1st January 1999 to 31st December 2015]. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].



Стаття надійшла 21.04.2026
Стаття прийнята 23.04.2026
Опубліковано 29.05.2026

С. О. Столетов

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна

Тел.: +380673674043, E-mail: stoletoff.s.a@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-2534>

П. О. Хозя

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна

Тел.: +380504410342, E-mail: pavlo.khozia@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8948-6032>

М. В. Григорошенко

Публічне акціонерне товариство «Крюківський вагонобудівний завод»,

вул. І. Приходька, 139, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна

Тел.: +380675454575, E-mail: icenter1@kvsz.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7946-1835>

ХОДОВІ ДИНАМІЧНІ ТА МІЦНОСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВАГОНА-ХОПЕРА ДЛЯ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ЦЕМЕНТУ МОДЕЛІ 19-7160

В статті проаналізовано існуючі дослідження щодо оцінки динамічних та міцносних якостей новостворених, модернізованих, а також моделей вантажних вагонів після їх тривалої експлуатації. Обґрунтовано необхідність експериментального оцінювання показників ходових динамічних якостей руху та міцності конструкції бункерного вагона для перевезення цементу моделі 19-7160 на відповідність чинним нормативним вимогам.

Описано конструктивні особливості та представлено технічні характеристики вагона для перевезення цементу моделі 19-7160. Описано методологію проведення ходових динамічних та міцносних випробувань. Наведено місця розташування схем і тензорезисторів під час проведення ходових динамічних та міцносних випробувань. Описано формули для визначення таких основних показників динамічних якостей вагонів як коефіцієнт запасу стійкості колеса від сходження з рейок, коефіцієнт запасу поперечної стійкості від перекидання під час дії бічних сил у кривих, коефіцієнт вертикальної динаміки кузова, коефіцієнт вертикальної динаміки необресореної рами візка, коефіцієнт горизонтальної динаміки кузова.

У статті наведено результати експериментального оцінювання динамічних показників якості руху бункерних вагонів для перевезення цементу моделі 19-7160 у порожньому та завантаженому до максимальної вантажопідйомності станях. Наведено точки з мінімальними значеннями коефіцієнтів запасу опору втоми у елементах металоконструкції вагона. За результатами аналізу отриманих

© Столетов С. О., Хозя П. О., Григорошенко М. В., 2026

числових значень показників динамічних якостей руху вагонів та коефіцієнтів запасу опору втомі у порожньому та завантаженому до максимальної вантажопідйомності станах встановлено, що ці показники знаходяться в межах допустимих значень згідно вимог ДСТУ 7598. Визначено можливість подальшої експлуатації вагонів-цементовозів моделі 19-7160 зі швидкостями до 120 км/год включно за динамічними якостями руху та показниками міцності цих вагонів.

Ключові слова: бункер, вагон-хопер, випробування, дослідження, динаміка, кузов, металоконструкція, міцність, рама, цементовоз.

Вступ та постановка проблеми. Наявний вітчизняний парк бункерних вагонів для перевезення цементу потребує оновлення сучасними інноваційними вагонами з покращеними технічними та експлуатаційними характеристиками. Особливо актуальним питання оновлення цього типу рухомого складу постане у найближчій перспективі після закінчення бойових дій та необхідності виконання значного обсягу будівельних робіт. Тому, розуміючи цей факт, вітчизняні вагонобудівні підприємства протягом останнього часу активно спрямовують свої зусилля на розроблення нових моделей бункерних вагонів для перевезення цементу та інших будівельних матеріалів.

В рамках ініціативної розробки Публічним акціонерним товариством «Крюківський вагонобудівний завод» (далі – ПАТ «КВБЗ») було створено сучасний бункерний вагон для перевезення цементу моделі 19-7160 зі збільшеним об'ємом кузова (не менше 76 м³) та вантажопідйомністю 73,5 т (з урахуванням не перебільшення встановленого розрахункового статичного навантаження від колісної пари на рейки). Основною метою створення цього вагона було більш ефективне перевезення швидкотвердіючого типу цементу з насипною щільністю менше ніж 1 т/м³ та інших нетоксичних (неотруйних) будівельних і гранульованих сипких вантажів, які потребують захисту від атмосферних опадів, розширення номенклатури продукції, що виготовляється заводом, та найбільш повного задоволення вимог потенційних споживачів. Цей вагон призначений для безтарного перевезення цементу по залізницях колії 1520 мм з гравітаційним завантаженням через верхні люки та гравітаційним розвантаженням у міжрейковий простір через нижні розвантажувальні люки на спеціальних розвантажувальних пристроях. Вагон моделі 19-7160 має габарит 1-ВМ та можливість допуску до обороту на магістральних і ряду інших ліній залізниць європейських країн-членів Організації співробітництва залізниць колії 1435 мм, що використовуються для міжнародних сполучень, за погодженими маршрутами з перестановкою візків на колію 1435 мм.

В той же час для підтвердження заявлених технічних характеристик вагона моделі 19-7160 потрібне проведення комплексу науково-експериментальних досліджень. У цій роботі пропонується зосередити зусилля на динамічних та міцносних показниках. Слід зазначити, що від фактичних значень цих показників напряду залежить безпека руху на залізниці, тому необхідність та актуальність їх визначення в ході проведення ходових та міцносних досліджень є беззаперечною та першочерговою.

Аналіз останніх досліджень. Питанню оцінки динамічних та міцносних якостей руху вантажних вагонів завжди приділялась значна увага. Особливо детально це питання розглядається під час постановки на виробництво нових та удосконаленні існуючих моделей вантажних вагонів, а також після удосконалення та модернізації конструкції ходових частин вагонів.

У статті [1] наведено аналіз результатів науково-експериментальних досліджень під час постановки на виробництво вагона-самоскида моделі 33-7141, у тому числі виконано оцінку його динамічних та міцносних якостей.

У роботах [2-4] проведено науково-експериментальні дослідження з оцінки динамічних та міцносних якостей новостворених моделей вагонів-платформ моделей 13-4155, 13-1894, 13-7133. За аналізом результатів проведених науково-експериментальних досліджень встановлено, що динамічні та міцносні показники цих вагонів задовольняють нормативним допустимим значенням. За підсумками позитивних результатів науково-експериментальних досліджень зазначені новостворені моделі вагонів-платформ поставлені до серійного виробництва.

У публікації [5] наведено аналіз результатів науково-експериментальних досліджень під час постановки на виробництво вагона-хопера для перевезення сипких вантажів моделі 19-7154. Виконано ходові динамічні у порожньому та завантаженому станах та ходові міцносні випробування у завантаженому стані вагона, за результатами яких підтверджено відповідність теоретично-розрахунковим даним та нормативним допустимим значенням.

У дослідженні [6] наведено результати науково-експериментальних досліджень в рамках постановки на виробництво вагона для цементу бункерного типу моделі 17-1890. В дослідженні проаналізовано визначені ходові динамічні показники у порожньому та завантаженому станах вагона, а також виконано порівняння отриманих значень з нормативними. На підставі отриманих експериментальних даних під час ходових міцносних досліджень визначено коефіцієнти запасу опору втомі елементів конструкції рами та бункерів вагона із розрахунку його експлуатації протягом 28 років. Отримані фактичні значення знаходились в межах нормативних вимог.

Стаття [7] присвячена особливості створення шестивісного зчленованого 80 футового вагона-платформи типу Sggrss моделі 13-7147. Наведено результати теоретичних досліджень та комплексних натурних випробувань на відповідність стандартам Європейського Союзу. Підтверджено відповідність міцносних показників вагона-платформи за різних схем її навантаження контейнерами. Результати виконаних випробувань дослідного зразка вагона-платформи моделі 13-7147 підтвердили повну відповідність його технічних показників вимогам TSI до вантажних вагонів цього класу під час руху зі швидкостями до 120 км/год у залізничній системі Європейського Союзу. Отримано комплект міжнародних сертифікатів та дозволів на право вільної експлуатації вагонів-платформ моделі 13-7147 на коліях шириною 1435 мм України та країн Європейського Союзу.

У роботі [8] виконано експериментальне оцінювання якості руху легковагових вагонів, які найчастіше сходили з рейок, а саме вагони-платформи моделей 13-4012, вагони-хопери для цементу зі знятим дахом моделі 19-758-01, вагони-цистерни моделі 15-1443. За результатами проведених ходових динамічних випробувань вагона-платформи моделі 13-4012, вагона-хопера зі знятим дахом моделі 19-758-01, вагона-цистерни моделі 15-1443 у порожньому стані встановлено відповідність та невідповідність до чинних вимог щодо динамічних якостей цих вагонів.

У статті [9] виконано експериментальні дослідження показників якості руху переобладнаних вагонів-хоперів моделей 11-715-01 та 19-923-01 з цементовозів та мінераловозів для перевезення сипучих вантажів, які не потребують захисту від атмосферних опадів. Результати виконаних досліджень показали, що показники динаміки знаходилися в допустимих межах для руху із швидкостями до 80 км/год включно.

У роботі [10] виконано дослідження міцносних показників модернізованого вагона-зерновоза моделі 19-752 з посиленою хребтовою балкою. За результатами досліджень встановлено, що рівні напружень у несних конструкціях вагона не перевищують допустимих нормативних значень. Визначено, що розрахунковий залишковий ресурс модернізованого вагона з посиленою хребтовою балкою складає не менше 6 років.

Стаття [11] присвячена дослідженням показників міцності перспективної конструкції вагона-зерновоза для країн Європи. Доведено, що показники міцності несучих металоконструкцій перспективного вагона-зерновоза знаходяться в межах допустимих значень і конструкція вагона, у цілому, має достатній запас міцності.

У роботах [12, 13] визначено динаміко-міцносні якості критого вагона моделі 11-217; вагона-платформи моделі 13-401; вагона-цистерни моделі 15-1443-06; вагона-хопера для перевезення окатишів моделі 20-9749 з урахуванням корозійних зносів за фактичними розмірами несних металоконструкцій цих вагонів.

У публікації [14] визначено вплив технічного стану та зношення ковзунів на динамічні показники руху вантажних вагонів. У статті [15] досліджено динамічні показники вагона-цистерни моделі 15-1900 та піввагона моделі 12-1905, обладнаних візками моделі 18-1711 з осьовим навантаженням 25 тс та уніфікованих за основними вузлами й деталями з вантажними вагонами попереднього покоління.

Вплив поперечного та поздовжнього зміщення центру ваги в піввагонах на їх динамічні якості розглянуто в роботі [16].

Таким чином, у роботах [1-7] наведено та проаналізовано результати ходових динамічних та міцносних науково-експериментальних досліджень таких новостворених моделей вантажних вагонів як 33-7141, 13-4155, 13-1894, 13-7133, 19-7154, 17-1890, 13-7147. У дослідженнях [8-13] виконано оцінку динамічних та міцносних якостей вагонів моделей 11-217, 11-715-01, 13-401, 13-4012, 15-1443, 15-1443-06, 19-752, 19-758-01, 19-923-01, 20-9749 після їх тривалої експлуатації з урахуванням деградаційних змін та модернізацій, якщо такі виконувались. У публікаціях [14-16] розглянуто вплив на динамічні якості вантажних вагонів окремих вузлів та факторів, як то технічний стан та зношення ковзунів, впровадження візків нової моделі 18-1711 з осьовим навантаженням 25 тс, поперечне та поздовжнє зміщення центру ваги.

За результатами проведеного аналізу існуючих досліджень можна зробити висновок, що питанню оцінки ходових динамічних та міцносних показників вантажних вагонів завжди приділяється значна увага. Питання підвищеної уваги до цих досліджень пов'язане з безпекою руху на залізниці, мінімізації та попередженню аварійних ситуацій на залізничному транспорті. Тому це питання залишається актуальним як під час постановки на виробництво новостворених моделей вантажних вагонів, так і в експлуатації після їх модернізації, зношення несучих конструкцій та елементів ходових частин.

Отже, новостворений ПАТ «КВБЗ» бункерний вагон-хопер для перевезення цементу моделі 19-7160, який має свої конструктивні особливості, потребує проведення комплексу ходових динамічних та міцносних досліджень для підтвердження теоретичних розрахунків на етапі проектування, подальшої безпечної експлуатації та можливості серійного виробництва. При цьому під час проведення зазначених досліджень пропонується враховувати конструктивні особливості вагона та практичний досвід, який наведено у вищенаведених роботах.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Мета статті – виконати експериментальне оцінювання показників ходових якостей руху та міцності конструкції бункерного вагона-хопера для перевезення цементу моделі 19-7160 на відповідність чинних нормативних вимог.

У процесі досягнення поставленої мети пропонується вирішення таких задач:

- представлення конструктивних особливостей, загального вигляду, технічних характеристик вагона для перевезення цементу моделі 19-7160;
- проведення ходових динамічних та міцносних експериментальних досліджень вагона для перевезення цементу моделі 19-7160;
- визначення динамічних та міцносних показників бункерного вагона для перевезення цементу моделі 19-7160 у порожньому та завантаженому станах за результатами виконаних ходових досліджень;
- аналізування отриманих числових значень динамічних та міцносних показників, їх порівняння з нормативними допустимими значеннями та надання рекомендацій щодо можливості постановки на виробництво вагона моделі 19-7160.

Матеріал та результати досліджень. Новостворений ПАТ «КВБЗ» бункерний вагон-хопер для перевезення цементу моделі 19-7160 складається з таких основних частин: кузова, рами, гальма автоматичного, гальма стоянкового, автозчепних пристроїв, ходових частин, завантажувальних люків, бункерів з розвантажувальними люками. Конструктивними особливостями новоствореної моделі вагона є збільшений об'єм кузова до 76 м³ за рахунок того, що дах має більш виражену краплеподібну форму, а торцева стіна – тільки похилу поверхню. Розташування завантажувальних та розвантажувальних люків, база вагона враховують вже наявну інфраструктуру підприємств-виробників та терміналів розвантаження споживачів цементу. Габарит 1-ВМ вагона для цементу моделі 19-7160 має можливість допуску до обороту на магістральних і ряду інших ліній залізниць європейських країн-членів Організації співробітництва залізниць колії 1435 мм, що використовуються для міжнародних сполучень, за погодженими маршрутами з перестановкою візків на колію 1435 мм. Вагон обладнаний місцями для встановлення спеціалізованих вібраторів на бункерах. Усі чотири завантажувальні люки можна опломбувати однією пломбою, що пришвидшує процес завантаження та знижує експлуатаційні витрати. Кути нахилу торцевих стін та бункерів розвантажувальних люків дозволяють швидко та безперешкодно розвантажити цемент.

Зовнішній вигляд бункерного вагона-хопера для перевезення цементу моделі 19-7160, зображено на рис. 1. Основні технічні характеристики вагона моделі 19-7160 наведено в табл. 1.



Рис. 1. Зовнішній вигляд вагона-цементовоза моделі 19-7160

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таблиця 1. – Технічні характеристики вагона-хопера моделі 19-7160

Найменування характеристики	Значення характеристики
Вантажопідйомність, т	73,5
Об'єм кузова, м ³	76,0
Маса тари вагона, не більше, т	20,5
Питома матеріалоємність	0,279
Питомий об'єм, м ³ /т	1,034
Матеріал кузова	09Г2, 09Г2С, 09Г2Д, 10СХНД, 10Г2БД, 10Г2ФД, S355J2+N, YQ450NQR1
Розрахункове навантаження від колісної пари на рейки, кН (тс)	230,5 (23,5)
Кількість люків, шт	
завантажувальних	4
розвантажувальних	4
Ширина колії, мм	1520
Максимальна швидкість, км/год	120
База вагона, мм	7700
Довжина по осях зчеплення, мм	11920
Довжина по кінцевим балкам рами, мм	10700
Максимальна ширина, мм	3240
Висота від рівня головки рейки, мм	4650
Кількість осей, шт	4
Модель візка	18-7055
Габарит по ДСТУ Б.В.2.3-29	1-ВМ
Нормативний строк служби, років	26

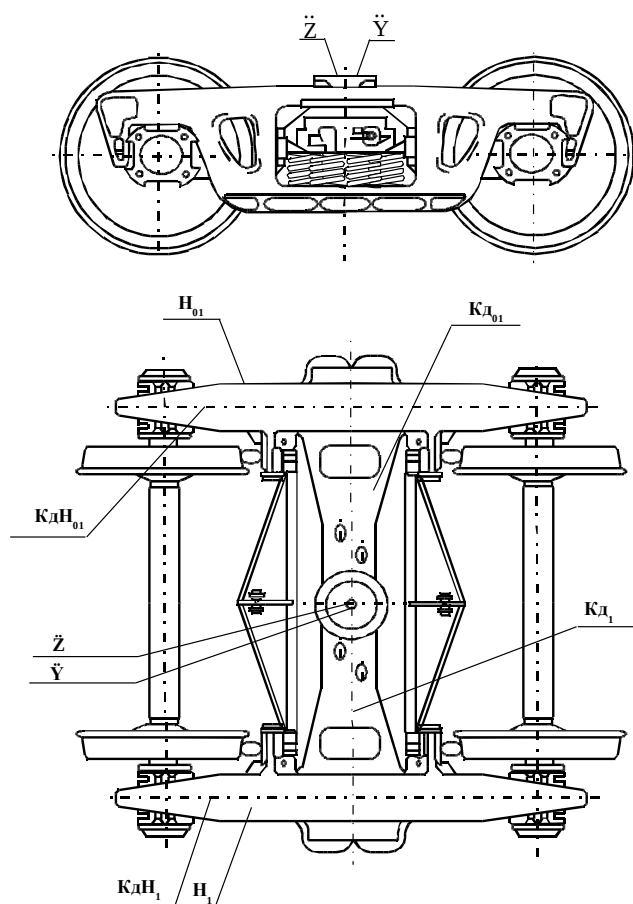
Ходові динамічні науково-експериментальні дослідження проводились фахівцями ДП «УкрНДІВ» спільно з співробітниками ПАТ «КВБЗ» у складі дослідного зчепу. Дослідний зчеп був сформований з: локомотива, дослідного вагона-цементовоза моделі 19-7160 у порожньому стані (№ 00002502), динамометричного вагона-лабораторії, дослідного вагона-цементовоза моделі 19-7160 у завантаженому стані (№ 00002501), на ділянці «Самар-Дніпровський – Балівка – Самар-Дніпровський – Воскобійня – Сухачівка – Дніпро-Львівська – Самар-Дніпровський» Придніпровської залізниці.

Ділянка колії, на якій проводились науково-експериментальні дослідження, відповідала вимогам до колії для проведення ходових динамічних випробувань.

В ході підготовки до ходових динамічних науково-експериментальних досліджень проводилося тарування вертикальних і горизонтальних сил. Тарування вертикальних сил проводилося шляхом навантаження візка кузовом вагона, а горизонтальних сил проводилося механічно шляхом прикладання до бокових рам візка в буксових вузлах послідовних еталонних навантажень у горизонтальній площині перпендикулярно до осі залізничної колії. Перед початком проведення ходових динамічних науково-експериментальних досліджень виконувалося поколісне зважування дослідних вагонів.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Під час підготовки дослідних вагонів до ходових динамічних науково-експериментальних досліджень підбирались тензорезистори, виконувалась зачистка та підготовка місць установки тензорезисторів, здійснювалась наклеювання тензорезисторів на візки та кузови дослідних вагонів. Тензорезистори, за допомогою підпаяних до них кабелів, з'єднувались з масштабними перетворювачами і апаратурою, встановленою у вагоні-лабораторії, що реєструє й обробляє дані випробувань. Умовами початку проведення науково-експериментальних досліджень є завершення монтажу, налагодження вимірювальних схем і перевірка роботоздатності випробувального устаткування. Місця розташування вимірювальних схем на візках вагонів моделі 19-7160, зображено на рис. 2.



- H_1, H_{01} - місце розташування вимірювальних схем для визначення рамних сил;
- K_{d1}, K_{d01} - місце розташування вимірювальних схем для визначення коефіцієнта вертикальної динаміки кузова;
- K_{dH1}, K_{dH01} - місце розташування вимірювальних схем для визначення коефіцієнта вертикальної динаміки необресованої частини візка;
- Ψ - місце розташування вимірювальних схем для визначення горизонтального прискорення;
- Z - місце розташування вимірювальних схем для визначення вертикального прискорення.

Рис. 2. Схема розташування приладів, вимірювальних на елементах візка вагона-цементовоза моделі 19-7160

Ходові динамічні науково-експериментальні дослідження проводилися під час дослідних поїздок у реальних умовах експлуатації з реєстрацією динамічних процесів і деформацій у контрольних точках. Реєстрація вимірюваних процесів ходових динамічних випробувань проводилась на прямих і кривих ділянках колії і стрілочних переводах у всьому проектному діапазоні допустимих експлуатаційних швидкостей аж до швидкості, що перевищує конструкційну на 12 км/год на прямих ділянках. Під час руху в кривих і стрілочних переводах виконувалось дотримання установлених правил технічної експлуатації і нормативних указівок щодо швидкостей руху. При цьому розпочинались дослідження з малих швидкостей (30-40) км/год, із подальшим збільшенням швидкості руху до максимальної. Дослідні дані групувались за діапазонами швидкостей руху (10-20 км/год), характерними особливостями дослідних ділянок залізничної колії (пряма, крива, стрілки і ін.).

У процесі ходових динамічних випробувань вагона, вимірювались, аналізувались та визначалися такі показники та їх величини:

- коефіцієнт запасу стійкості колеса від сходження з рейок – K_{yc} ;
- коефіцієнт запасу поперечної стійкості від перекидання під час дії бічних сил у кривих – K_c ;
- коефіцієнт вертикальної динаміки кузова – K_o ;
- коефіцієнт вертикальної динаміки необресореної рами візка – K_{on} ;
- коефіцієнт горизонтальної динаміки кузова – K_z ;
- бічна (рамна) сила – H_p , кН;
- прискорення кузова вертикальні – Z , в долях g ;
- прискорення кузова горизонтальні – Y , в долях g .

Також в процесі досліджень вимірюють сили, що діють на вагон, та швидкості його руху.

Обробка даних ходових динамічних науково-експериментальних досліджень передбачає розшифрування, ідентифікацію та систематизацію зареєстрованих динамічних процесів. Під час аналізу записів динамічних процесів визначають характерні види коливань, оцінюють залежність характеру і інтенсивності коливань залежно від умов руху. У зв'язку з ймовірнісною природою показників динамічної навантаженості ходових частин вагонів застосовують відповідний математичний апарат теорії ймовірностей. Максимальні значення K_o , та K_z визначались з довірчою ймовірністю 0,97, а значення K_{yc} – з довірчою ймовірністю не менше 0,999.

Ходові міцносні випробування проводились фахівцями ДП «УкрНДІВ» спільно з співробітниками ПАТ «КВБЗ» у складі дослідного зчепу. Дослідний зчеп був сформований з: локомотива, дослідного вагона для перевезення цементу моделі 19-7160 (№ 00002501), динамометричного вагона-лабораторії, на ділянці між станціями «Самар-Дніпровський–Балівка–Самар-Дніпровський» магістральних залізничних колій регіональної філії Придніпровська залізниця. Ділянка колії, на якій проводились науково-експериментальні дослідження, відповідала вимогам до залізничної колії для проведення ходових міцносних випробувань.

Для реєстрації показників міцності вагона використовувались тензометричні датчики з базою 20 мм. Місця розташування тензорезисторів на елементах металоко-нструкцій вагона під час проведення ходових міцносних науково-експериментальних досліджень, наведено на рис. 3.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

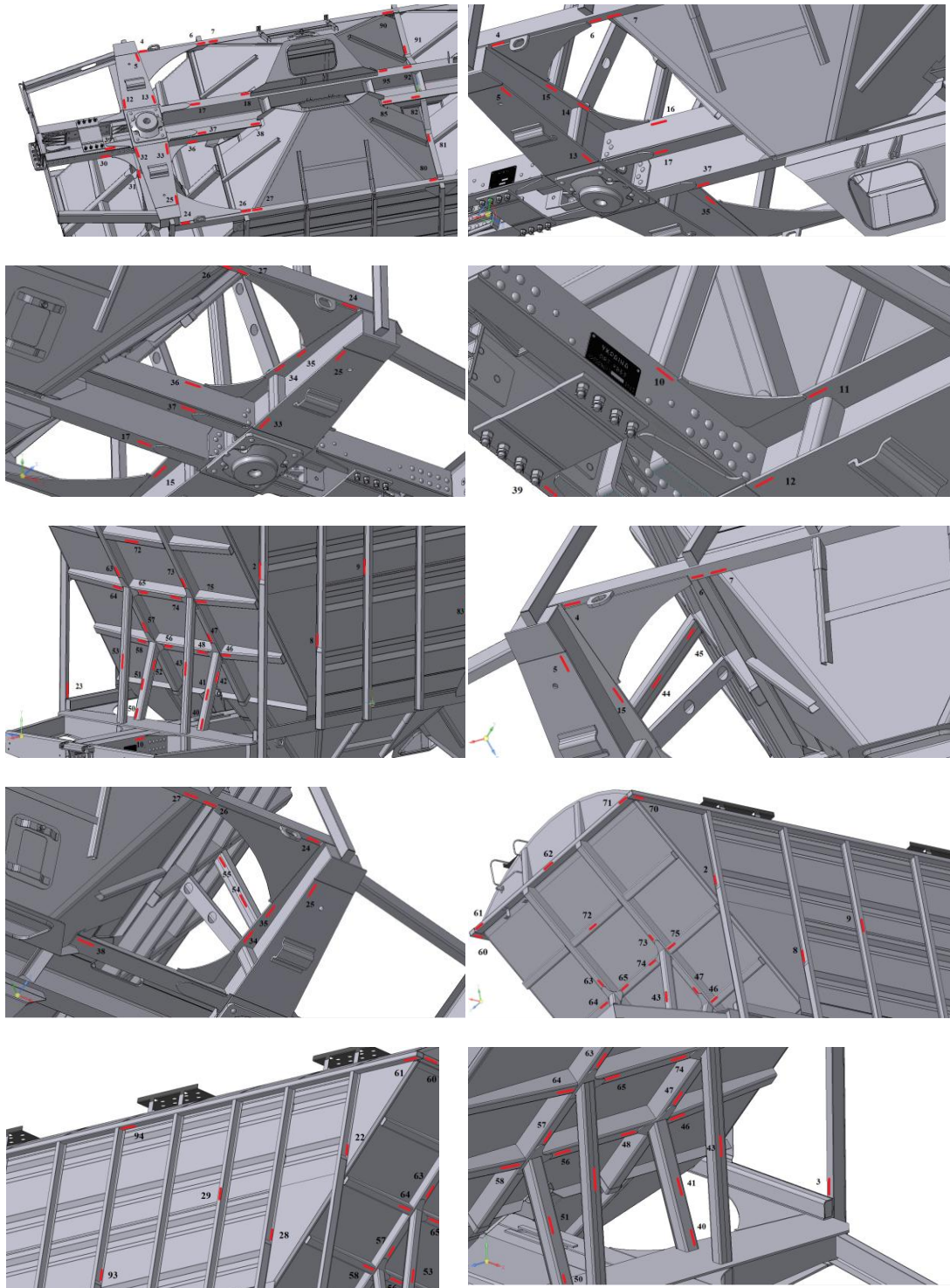


Рис. 3. Розташування тензорезисторів на рамі та кузові вагона-цементовоза моделі 19-7160

Підготовка, проведення та обробка даних ходових динамічних та міцносних науково-експериментальних досліджень здійснювались згідно методики М 6.5.00745 [17].

В процесі обробки швидкість руху, сили, що діють на вагон, прискорення кузова вертикальні, прискорення кузова горизонтальні визначались визначались методом безпосередніх вимірювань зазначених величин.

Для оцінки ходових якостей за величинами виміряних показників вагонів, з використанням співвідношень, отриманих під час тарування, визначались ймовірні максимальні значення K_{yc} , K_c , K_o , K_{on} , K_z .

Оцінка коефіцієнта запасу стійкості колеса від сходження з рейок K_{cm} визначалось за формулою [17]:

$$K_{yc} = \frac{tg\beta - \mu}{1 + \mu tg\beta} \times$$

$$\times \frac{Q_{ш} \cdot \left(\frac{2(b-2a_2)}{l} - K_o^n \frac{2(b-2a_2)}{l} + K_o^{nn} \frac{a_2}{l} \right) + q \frac{b-2a_2}{l} + \frac{r}{l} H_p}{\mu Q_{ш} \cdot \left(\frac{2(b-2a_1)}{l} + K_o^n \frac{a_1}{l} - K_o^{nn} \frac{2(b-2a_2)}{l} \right) + \mu q \frac{b-2a_1}{l} + \left(1 - \frac{r}{l} \mu \right) H_p}, \quad (1)$$

де β – кут нахилу твірної гребеня колеса до горизонтальної осі; $\beta = 60^\circ$;

μ – коефіцієнт тертя; $\mu = 0,25$;

$Q_{ш}$ – сила тяжіння надресорних частин вагона, діюча на шийку осі колісної пари, кН;

$2b$ – відстань між серединами шийок осі колісної пари, м;

a_1 , a_2 – розрахункова відстань від точок контакту коліс з рейками до середини відповідних (набігаючи і ненабігаючих) шийок осі колісної пари приймаються відповідно 0,25 м та 0,22 м;

$2l$ – база візка, м;

K_o^n – коефіцієнт вертикальної динаміки на набігаючому колесі;

K_o^{nn} – коефіцієнт вертикальної динаміки на ненабігаючому колесі;

q – сила тяжіння непідресорених частин вагона, які приходять на колісну пару, кН;

r – радіус кола кочення колеса, м;

H_p – горизонтальна бокова рамна сила, кН.

Коефіцієнт запасу поперечної стійкості вагона від бокового перекидання у порожньому та завантаженому станах K_c визначають за величинами динамічних сил, що діють у експлуатації на вагон під час проходження кривих ділянок колії різного радіуса зі швидкостями, при яких реалізується рівень непогашеного прискорення до $0,7 \text{ м/с}^2$ з відношення (2):

$$K_c = \frac{K_\delta^n - K_\delta^p + 2}{K_\delta^n + K_\delta^p}, \quad (2)$$

де K_δ^n, K_δ^p – максимально ймовірні значення коефіцієнтів вертикальної динаміки (перевантаження і розвантаження) навантаженої і розвантаженої сторін візка вагона відповідно, визначені за напруженнями (деформаціями) бокових рам, значення K_δ^n і K_δ^p приймають додатними у випадку розвантаження коліс.

Коефіцієнт вертикальної динаміки кузова (необресореної рами візка) $K_\delta, K_{\delta n}$ у загальному вигляді визначають:

$$K_\delta(K_{\delta n}) = \frac{\sigma_\delta}{\sigma_{cm}}, \quad (3)$$

де σ_δ – динамічне напруження від вертикального навантаження в перерізі даного елемента, МПа;

σ_{cm} – статичне напруження від вертикального навантаження у тому ж перерізі, МПа.

Коефіцієнт горизонтальної динаміки K_z визначають за формулою:

$$K_z = \frac{H_p}{P_0}, \quad (4)$$

де P_0 – вертикальне статичне навантаження від осі на рейки, кН.

Максимально та мінімально ймовірні значення показників ходових динамічних процесів визначались за формулами [17]:

$$X_{\max}^{i\text{моб}} = \bar{X} + k \cdot S, \quad (5)$$

$$X_{\min}^{i\text{моб}} = \bar{X} - k \cdot S, \quad (6)$$

де $\bar{X}$ – середні статистичні значення показника;

k – коефіцієнт, що залежить від рівня довірчої імовірності та визначає розмір довірчого інтервалу;

S – середнє квадратичне відхилення.

За результатами проведення ходових міцносних науково-експериментальних досліджень визначались коефіцієнти опору втомі елементів конструкції кузова вагона, із розрахунку його експлуатації на 26 років, за формулою (7) [17]:

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,e}} \geq [n], \quad (7)$$

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

де $\sigma_{a,N}$ – границя витривалості (за амплітудою) натурної деталі за симетричним циклом і установленим режимом навантажень на базі випробувань N_0 ;

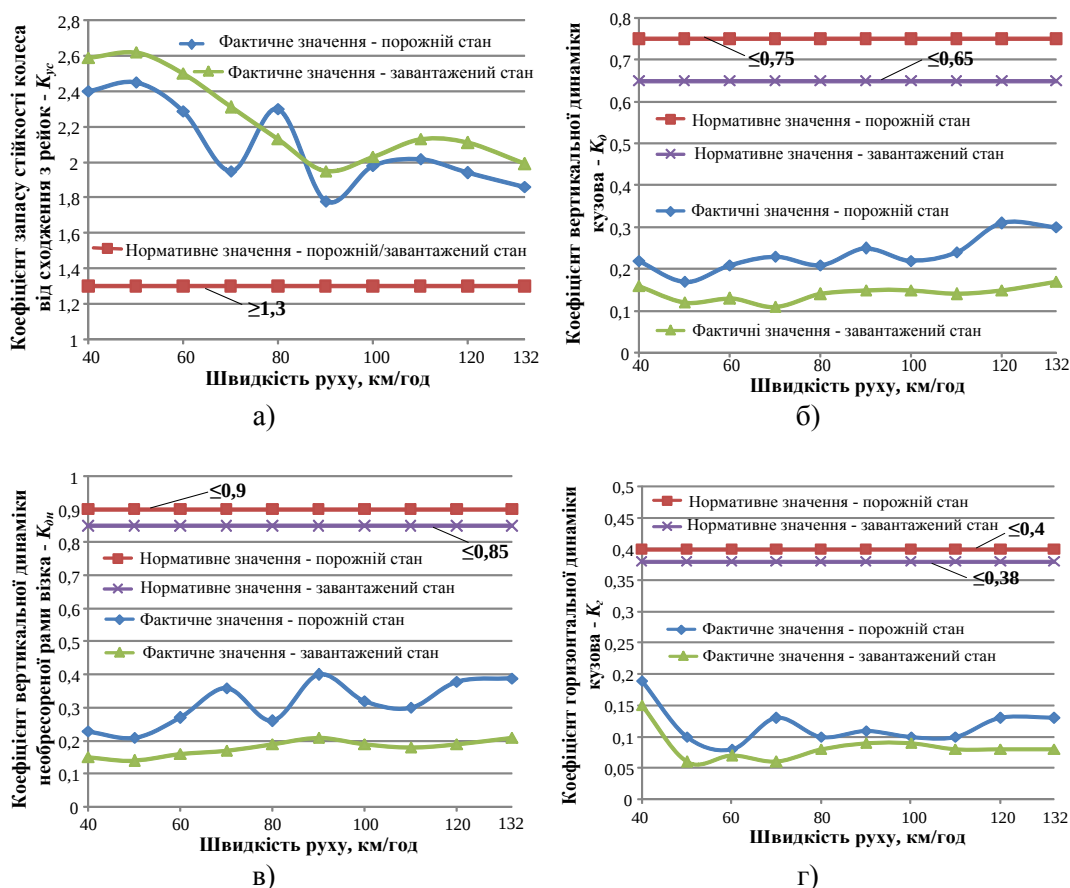
$\sigma_{a,e}$ – розрахункова величина еквівалентної амплітуди динамічного напруження у реальному режимі експлуатаційних випадкових навантажень за проектний термін служби конструкції;

$[n]$ – допустимий коефіцієнт запасу опору втомі.

Згідно вимог [18] прийнято: коефіцієнт кривої втомі $m = 4,0$ та загальний коефіцієнт зниження границі витривалості даної натурної деталі відносно границі витривалості гладкого стандартного зразка $k_{\sigma k} = 1,88$; середнє значення границі витривалості $\sigma_{-1} = 265$ МПа (для балки хребтової), 220 МПа (для балки шворневої), 225 МПа (для інших елементів).

Результати ходових динамічних науково-експериментальних досліджень вагона для перевезення цементу моделі 19-7160 у порожньому та завантаженому станах, зображено на рис. 4 та табл. 2.

Точки та значення мінімальних фактичних значень коефіцієнтів запасу опору втомі у елементах металоконструкції вагона для перевезення цементу моделі 19-7160 у завантаженому стані, визначених експериментально-розрахунковим шляхом, зображено на рис. 5.



РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

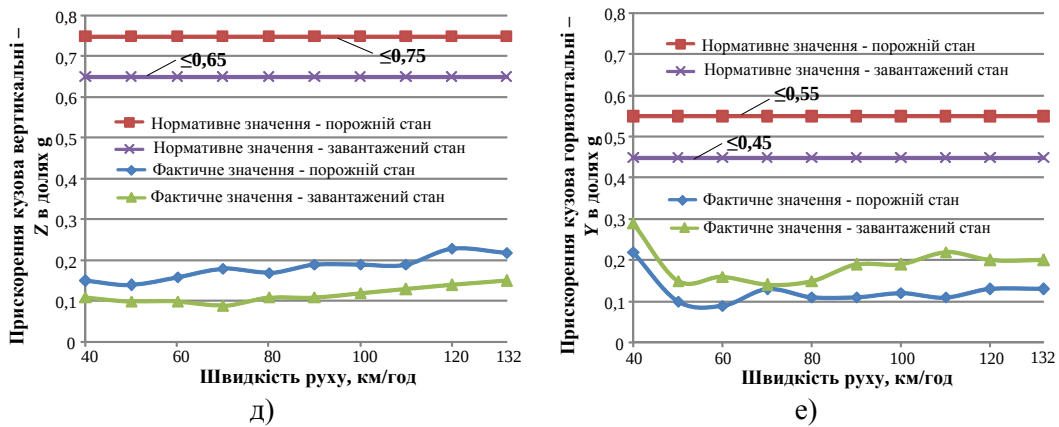


Рис. 4. Результати ходових динамічних досліджень вагона моделі 19-7160:
а) K_{yc} ; б) K_{∂} ; в) $K_{\partial n}$; г) K_c ; д) Z ; е) Y

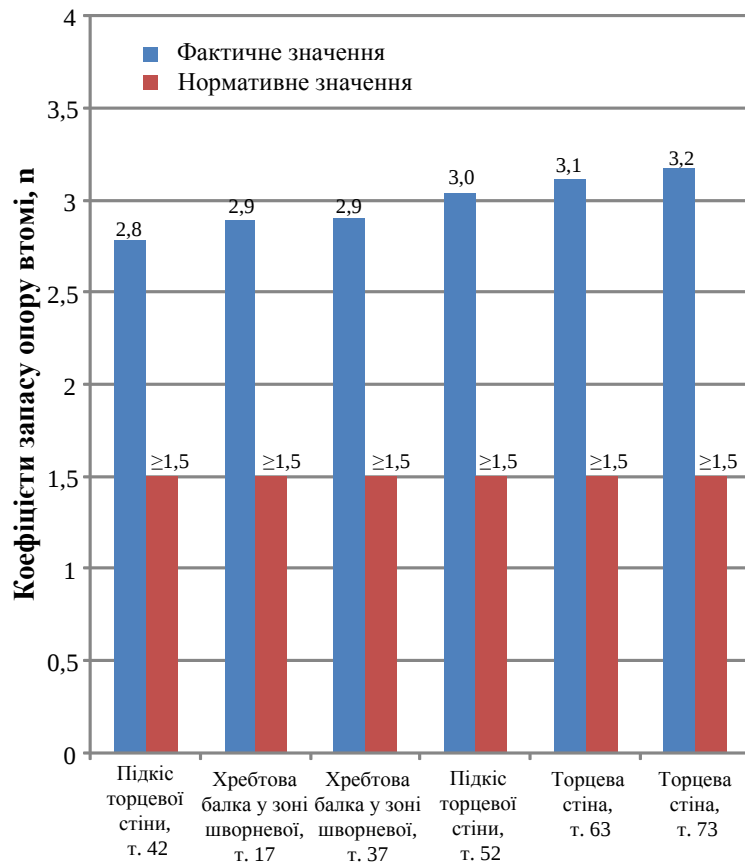


Рис. 5. Точки з мінімальними значеннями коефіцієнтів запасу опору втомі у елементах металоконструкції вагона

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таблиця 2. – Результати визначення коефіцієнта запасу поперечної стійкості вагона моделі 19-7160

Коефіцієнт запасу поперечної стійкості від перекидання при русі у кривих від дії бічних сил – K_c :	Фактичне значення	Нормативне значення
Порожній стан		
– на зовнішню сторону кривої;	8,1	$\geq 1,3$
– на внутрішню сторону кривої	8,1	$\geq 1,2$
Завантажений стан		
– на зовнішню сторону кривої;	7,1	$\geq 1,3$
– на внутрішню сторону кривої	8,1	$\geq 1,2$

Висновки.

1. Ходові динамічні показники якості ходу вагона моделі 19-7160 в порожньому та завантаженому станах відповідають чинним нормативним вимогам для вантажних вагонів у всьому діапазоні експлуатаційних швидкостей аж до конструкційної включно на залізничних коліях, які за станом поточного утримання відповідають вимогам руху із вказаними швидкостями.

2. На підставі проведеного аналізу результатів ходових міцносних науково-експериментальних досліджень вагона для перевезення цементу моделі 19-7160 можна зробити висновки, що цей вагон відповідає нормативним вимогам ДСТУ 7598 [18].

3. Результати проведених науково-експериментальних досліджень показали можливість подальшої експлуатації вагона для перевезення цементу моделі 19-7160 до 120 км/год включно без встановлення швидкісних обмежень в частині відповідності чинним вимогам динаміки його руху та міцності конструкції.

ЛІТЕРАТУРА

1. Хозя П.О., Юшко О.О., Орлов О.В., Хвоєнко Є.О., Григорошенко М.В. Науково-експериментальні дослідження технічних характеристик вагона-самоскида моделі 33-7141. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*. Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2022. Вип. 25. С. 129–143. DOI: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2022-25-129-143>
2. Рейдемейстер О.Г., Шикунів О.А., Ягода Д.О. Експериментальні дослідження технічних характеристик вагона-платформи моделі 13-4155. *2-а Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні технології засобів транспорту»*. Харків, 05-06 грудня.: Тези доповідей. Харків: УкрДУЗТ, 2024. С. 76–77.
3. Федорак І.І., Сулим А.О., Хозя П.О., Столетов С.О. Експериментальні дослідження вагона-платформи моделі 13-1894 для великотоннажних контейнерів. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*. Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2024. Вип. 29. С. 81–93. DOI: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2024-29-81-93>
4. Костриця С.А., Федоров Є.Ф., Болотов В.В., Грановська Н.Й. Ходові динамічні та міцносні випробування вагона-платформи для великотоннажних контейнерів моделі 13-7133 на візках з ковзунками зазорного типу для перевезення крупнотонажних контейнерів. Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : матеріали 81 Міжнародної науково-практичної конференції, 22-23 квітня 2021 р. / за заг. ред. А.В. Радкевича, Р.В. Рибалки. Дніпров. нац. ун-т. залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпро, 2021. С. 307–308.

5. Гречкін О.А., Єгоров Д.О. Створення вантажного вагону для перевезення сипких вантажів моделі 19-7154. *Залізничний транспорт України*. 2024. № 4. С. 4–9. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2024-153-4-04-09>
6. Сулим А.О., Орлов О.В., Столетов С.О., Федорак І.І. Експериментальні дослідження міцності конструкції та ходових якостей вагона для цементу бункерного типу. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*. Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2024. Вип. 28. С. 7–21. DOI: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2024-28-7-21>
7. Крамаренко М.В., Гречкін О.А., Плюгін О.І., Єгоров Д.О. Створення першого вітчизняного вантажного вагона для колії 1435 мм за вимогами TSI. *Залізничний транспорт України*. 2024. № 3. С. 4–14. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2024-152-3-04-14>
8. Фомін О.В., Прокопенко П.М., Горбунов М.І., Фоміна А.М. Оцінка показника якості руху легковагових вагонів в складі поїзда. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля*. 2019. № 2 (250). С. 103–109.
9. Фомін О.В., Кара С.В., Прокопенко П.М., Горбунов М.І., Фомін В.В. Оцінка динамічних якостей руху переобладнаних вагонів-хоперів після тривалої експлуатації. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2020. Вип. 36. С. 33–42. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-4>
10. Петренко В.О., Кельріх М.Б., Прокопенко П.М., Кара С.В. Оцінка несівної здатності модернізованої рами вагона-зерновоза. *Залізничний транспорт України*. 2022. № 3. С. 4–10. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2022-144-3-04-10>
11. Жигіль О.М., Прокопенко П.М., Кара С.В., Родіонов А.Ю. Дослідження показників міцності перспективної конструкції вагона-зерновоза для країни Європи. *Залізничний транспорт України*. 2025. № 2. С. 21–30. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2025-155-2-21-30>
12. Fomin O., Lovska A. Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6. No. 7 (108). P. 21–29. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217162>
13. Fomin O., Lovska A. Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 2. No. 7 (110). P. 6–14. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.220534>
14. Myamlin S., Neduzha L., Ten O., Shvets A. Determination of dynamic performance of freight cars taking into account technical condition of side bearers. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2013. № 1 (43). С. 162–169. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2013/9589>
15. Bubnov V.N., Myamlin S.V., Mankevych N.B. Dynamic performance of freight cars on bogies model 18-1711. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2013. № 4 (46). С. 118–126. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2013/16616>
16. Швець А.О. Вплив поздовжнього та поперечного зміщення центру ваги вантажу в піввагонах на їх динамічні показники. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2018. № 5 (71). С. 115–128. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/146432>
17. М 6.5 00745 Вагони вантажні та пасажирські. Методика випробувань (статичні випробування на міцність від дії вертикального навантаження, випробування на міцність від дії поздовжнього квазі-статичного навантаження, навантажень при ремонті та обслуговуванні, зосередженим вантажем, гідравлічних випробувань, розвантаження-завантаження, випробувань на співудар, власної частоти вигинних коливань кузова, ходових динамічних випробувань, ходових міцносних випробувань, плавності ходу та вібрації, випробувань з впливу на колію, поколісного зважування та випробувань з визначення показників шуму). Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2019. 39 с.
18. ДСТУ 7598:2014 Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Введено на підставі наказу ДП «УкрНДІВ» від 02.12.2014 № 1430. Київ, ДП «УкрНДІВ», 2014. 161 с.

S. O. Stoletov

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenчук, 39621, Ukraine
Tel.: +380673674043, E-mail: stoletoff.s.a@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-2534>

P. O. Khozia

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine
Tel.: +380536662043, E-mail: pavlo.khozia@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8948-6032>

M. V. Hryhoroshenko

Public joint-stock company «Kryukovsky Railway Car Building Works»,
139 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine
Tel.: +380675454575, E-mail: icenter@kvsz.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7946-1835>

RUNNING DYNAMIC AND STRENGTH STUDIES OF THE 19-7160 MODEL HOPPER CAR FOR TRANSPORTING CEMENT

The article analyses existing research on the assessment of the dynamic and strength characteristics of newly built, refurbished freight wagons models and railcar models after prolonged operation. The necessity of experimental assessment of the running dynamic qualities and structural strength of the 19-7160 model cement hopper car for compliance with current regulatory requirements is justified.

The design features and technical characteristics of the 19-7160 model cement freight car are outlined. The methodology for carrying out dynamic and strength tests is characterized. The locations of the diagrams and strain gauges during the dynamic and strength tests are given. Formulas are described for determining such basic indicators of the dynamic qualities of wagons as the coefficient of wheel stability against derailment, the coefficient of transverse stability against overturning under the action of lateral forces in curves, the coefficient of vertical dynamics of the body, the coefficient of vertical dynamics of the unsprung bogie frame, and the coefficient of horizontal dynamics of the body.

The article presents the results of experimental assessment of dynamic indicators of the quality of movement of 19-7160 model hopper cars for transporting cement under empty and maximum load capacity conditions. Points with minimum values of fatigue safety factor in the metal structure elements of the car are given. Based on the analysis of the numerical values of the dynamic performance indicators of the wagons and the fatigue safety factors in empty and maximum load capacity conditions, it was established that these indicators are within the permissible values according to the requirements of DSTU 7598. The possibility of further operation of 19-7160 model cement wagons at speeds up to 120 km/h inclusive was determined based on the dynamic movement characteristics and strength indicators of these wagons.

Keywords: cement silo, hopper car, testing, research, dynamics, body, metal structure, strength, frame, cement railcar.

REFERENCES

1. Khozia, P.O., Yushko, O.O., Orlov, O.V., Khvoienko, E.O., & Hryhoroshenko, M.V. (2022). Naukovo-eksperymentalni doslidzhennia tekhnichnykh kharakterystyk vahona-samoskyda modeli 33- 7141 [Scientific and experimental research on the technical characteristics of the 33-7141 model dump car]. *Zbirnyk naukovykh prats «Reikovi rukhomiy sklad» – Collection of scientific works ‘Railbound Rolling Stock’*, 25, 129–143. Kremenichuk: SE «UkrNDIV», DOI: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2022-25-129-143> [in Ukrainian].
2. Reidemester, O.H., Shikunov, O.A., & Yahoda, D.O. (2024). Eksperymentalni doslidzhennia tekhnichnykh kharakterystyk vahona-platformy modeli 13-4155 [Experimental studies of the technical characteristics of the 13-4155 model flatcar]. *Proceedings from 2-a Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia «Prohresyyni tekhnolohii zasobiv transportu» – The Second International Scientific and Technical Conference ‘Advanced Technologies for Transport’*. (pp. 76–77). Kharkiv: UkrDUZT [in Ukrainian].
3. Fedorak, I.I., Sulym, A.O., Khozia, P.O., & Stolietov, S.O. (2024). Eksperymentalni doslidzhennia vahona-platformy modeli 13-1894 dlia velykotonnazhnykh konteineriv [Experimental studies of the 13-1894 model flatcar for large-tonnage containers]. *Zbirnyk naukovykh prats «Reikovi rukhomiy sklad» – Collection of scientific papers ‘Railbound Rolling Stock’*, 29, 81–93. Kremenichuk: SE «UkrNDIV». DOI: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2024-29-81-93> [in Ukrainian].
4. Kostriysia, S.A., Fedorov, E.F., Bolotov, V.V., & Granovskaia, N.Y. (2021). Khodovi dynamichni ta mitsnosni vyprovuvannia vahona-platformy dlia velykotonnazhnykh konteineriv modeli 13-7133 na vizkakh z kovzunamy zazornoho typu dlia perevezennia krupnotonnazhnykh konteineriv [Running dynamic and strength tests of a flatcar for large-tonnage containers, model 13-7133, on bogies with gap-type skids for transporting large-tonnage containers]. Problems and prospects for the development of railway transport [Problemy ta perspektyvy rozvytku zaliz-nychnoho transportu]. *Proceedings of 81 Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii – The 81st International Scientific and Practical Conference*. A.V. Radkevich, R.V. Rybalko (Ed.). (pp. 307–308). Dniprov. nats. universytet zaliznykh. transp. im. akad. V. Lazariana – Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazarian. Dnipro [in Ukrainian].
5. Hrechkin, O.A., & Yehorov, D.O. (2024). Creation of a freight car for transporting bulk cargo, model 19-7154 [Stvorennia vantazhnoho vagonu dlia perevezennia sypanykh vantazhiv modeli 19-7154]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 4, 4–9. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2024-153-4-04-09> [in Ukrainian].
6. Sulym, A.O., Orlov, O.V., Stolietov, S.O., & Fedorak, I.I. (2024). Eksperymentalni doslidzhennia mitsnosti konstruksii ta khodovykh yakosteiv vahona dlia tseментu bunkernoho typu [Experimental studies of the structural strength and running characteristics of a bunker-type cement car]. *Zbirnyk naukovykh prats «Reikovi rukhomiy sklad» – Collection of scientific works ‘Railbound Rolling Stock’*, 28, 7–21. Kremenichuk: SE «UkrNDIV». DOI: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2024-28-7-21> [in Ukrainian].
7. Kramarenko, M.V., Hrechkin, O.A., Pliutin, O.I., & Yehorov, D.O. (2024). Stvorennia pershoho vitchyznianoho vantazhnoho vagonu dlia kolii 1435 mm za vymohamy TSI [Construction of the first domestic freight wagon for 1435 mm gauge in accordance with TSI requirements]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 3, 4–14. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2024-152-3-04-14> [in Ukrainian].
8. Fomin, O.V., Prokopenko, P.M., Horbunov, M.I., & Fomina, A.M. (2019). Otsinka pokaznyka yakosti rukhu lehko-vahovykh vagoniv v skladi poizda [Assessment of the quality indicator of light-weight wagons in a train]. *Visnyk Shkholno-kraivskoho natsionalnoho universytetu imeni V. Dalia – Bulletin of the V. Dahl East Ukrainian National University*, 2 (250), 103–109 [in Ukrainian].
9. Fomin, O.V., Kara, S.V., Prokopenko, P.M., Horbunov, M.I., & Fomin, V.V. (2020). Otsinka dynamichnykh yakosteiv rukhu pereobladnanykh vagoniv-khoperiv pislia tryvaloiv ekspluatatsii [Assessment of the dynamic qualities of converted hopper cars after prolonged operation]. *Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Seriiia «Transportni systemy i tekhnolohii» – Collection of scientific works of DUIT. Series ‘Transport Systems and Technologies’*, 36, 33–42. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-4> [in Ukrainian].
10. Petrenko, V.O., Kelrikh, M.B., Prokopenko, P.M., & Kara, S.V. (2022). Otsinka nesivnoi zdatnosti modernizovanoi rami vahona-zernovoza [Assessment of the load-bearing capacity of a modernised grain car frame]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 3, 4–10. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2022-144-3-04-10> [in Ukrainian].
11. Zhihil, O.M., Prokopenko, P.M., Kara, S.V., & Rodionov, A.Yu. (2025). Doslidzhennia pokaznykiv mitsnosti perspektyvnoi konstruksii vahona-zernovoza dlia krainy Yevropy [Research on the strength

indicators of a promising grain car design for European countries]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 2, 21–30. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2025-155-2-21-30> [in Ukrainian]

12. Fomin, O., & Lovska, A. (2020). Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6, 7 (108), 21–29. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217162>

13. Fomin, O., & Lovska, A. (2020). Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2, 7 (110), 6–14. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.220534>

14. Miamlin, S., Neduzha, L., Ten, O., & Shvets, A. (2013). Determination of dynamic performance of freight cars taking into account technical condition of side bearers. *Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana – Science and progress in transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk University of Railway Transport named after Academician V. Lazarian*, 1 (43), 162–169. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2013/9589>

15. Bubnov, V.N., Miamlin, S.V., & Mankevych, N.B. (2013). Dynamic performance of freight cars on bogies model 18-1711. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana – Science and progress in transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk University of Railway Transport named after Academician V. Lazarian*, 4 (46), 118–126. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2013/16616>

16. Shvets, A.O. (2018). Vplyv pozdovzhnogo ta poperechnoho zmishchennia tsentru vahy vantazhu v pivvohonakh na yikh dynamichni pokaznyky [The influence of longitudinal and transverse displacement of the centre of gravity of cargo in semi-wagons on their dynamic performance]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana – Science and Progress in Transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk University of Railway Transport named after Academician V. Lazarian*, 5 (71), 115–128. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/146432> [in Ukrainian]

17. Vahony vantazhni ta pasazhyrski. Metodyka vyprobuvan (statychni vyprobuвання na mitsnist vid dii vertykalnoho navantazhennia, vyprobuвання na mitsnist vid dii pozdovzhnogo kvazistatychnoho navantazhennia, navantazhen pry remonti ta obsluhovuvanni, zoseredzhenym vantazhem, hidravlichnykh vyprobuvan, rozvantazhennia-zavantazhennia, vyprobuvan na spivudar, vlasnoi chastoty vyhyunnykh koly-van kuzova, khodovykh dynamichnykh vyprobuvan, khodovykh mitsnosnykh vyprobuvan, plavnosti khodu ta vibratsii, vyprobuvan z vplyvu na koliiu, pokolisnoho zvazhuvannia ta vyprobuvan z vyznachennia pokaznykiv shumy) [Freight and passenger wagons. Testing methods (static tests for strength under vertical load, tests for strength under longitudinal quasi-static load, loads during repair and maintenance, concentrated load, hydraulic tests, unloading-loading, tests for impact, natural frequency of bending vibrations, running dynamic tests, running strength tests, smoothness of running and vibration, tests for impact on the track, wheel weighing and tests to determine noise indicators)]. (2019). *M 6.5 00745*. Kremenichuk: SE «UkrNDIV» [in Ukrainian]

18. Vahony vantazhni. Zahalni vymohy do rozrakhunkiv ta proektuvannia novykh i modernizovanykh vahoniv kolii 1520 mm (nesamokhidnykh) [Freight cars. General requirements for the calculation and design of new and modernized 1520 mm gauge cars (non-self-propelled)]. (2014). DSTU 7598:2014 from 2nd December 2014. Kyiv: SE «UkrNDNTs» [in Ukrainian].



Стаття надійшла 20.04.2026

Стаття прийнята 23.04.2026

Опубліковано 29.05.2026

А. О. Каграманян

Український державний університет залізничного транспорту
майдан Фейєрбаха 7, 61050, Харків, Україна
Тел.: +380577301005, E-mail: kartal@kart.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3520-4911>

Т. А. Аракелян

Український державний університет залізничного транспорту
майдан Фейєрбаха 7, 61050, Харків, Україна
Тел.: +380577301035, E-mail: arakelyan.ta.2026@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2062-6894>

СУЧАСНИЙ СТАН ТА УДОСКОНАЛЕННЯ НОРМАТИВНОЇ БАЗИ СИСТЕМ ОПИРАННЯ КОТЛІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ ЦИСТЕРН

У статті розглянуто сучасний стан та визначено ключові напрями удосконалення нормативно-стандартизаційної бази систем опирання котлів залізничних цистерн як одного з критично важливих елементів забезпечення безпеки перевезень рідких та небезпечних вантажів. Підкреслено, що надійність функціонування опорних вузлів безпосередньо впливає на міцність, довговічність і експлуатаційну придатність усього вагона-цистерни, особливо в умовах зростання швидкостей руху, підвищення осьових навантажень та інтенсифікації перевізного процесу. Проведено комплексний аналіз чинних нормативних документів, а також сучасних наукових досліджень, присвячених питанням розрахунку, проєктування та експлуатації несівних конструкцій вагонів-цистерн.

Встановлено, що існуюча нормативна база в багатьох аспектах є застарілою та не повною мірою враховує сучасні досягнення в галузі матеріалознавства, комп'ютерного моделювання та цифрових технологій моніторингу технічного стану. Виявлено відсутність єдиного підходу до оцінки втомної міцності вузлів опирання, а також недостатню деталізацію вимог до якості зварних з'єднань і процедур технічного діагностування.

Проаналізовано відмінності між північноамериканською та європейською системами стандартизації, що дозволило визначити основні тенденції розвитку нормативного регулювання, зокрема перехід від жорстко регламентованих параметричних вимог до підходів, заснованих на результатах випробувань і розрахунків.

Особливу увагу приділено впровадженню цифрових технологій, зокрема систем телематики та моніторингу навантажень, які забезпечують можливість прогнозування відмов і підвищення рівня безпеки експлуатації.

Визначено, що інтеграція таких систем потребує відповідного нормативного забезпечення, включаючи стандартизацію місць встановлення датчиків та параметрів контролю.

© Каграманян А. О., Аракелян Т. А., 2026

Також встановлено, що гармонізація національних стандартів із міжнародними вимогами є необхідною умовою забезпечення конкурентоспроможності вітчизняного вагонобудування на світовому ринку.

У результаті дослідження сформульовано основні напрями вдосконалення нормативно-стандартизаційної бази, серед яких: уточнення розрахункових схем навантаження опорних вузлів з урахуванням динамічних впливів; впровадження критеріїв оцінки втомної довговічності; розширення вимог до експериментальних випробувань; удосконалення стандартів якості зварних з'єднань; а також розвиток гібридних підходів до нормування, що поєднують прескриптивні та перформансні вимоги. Запропоновано концептуальні підходи до створення адаптивної нормативної системи, здатної оперативно реагувати на технологічні зміни та інновації.

Доведено, що модернізація нормативної бази систем опирання котлів залізничних цистерн є необхідною передумовою підвищення рівня безпеки перевезень, зниження ризику аварійних ситуацій та продовження терміну служби рухомого складу. Отримані результати можуть бути використані при розробленні нових стандартів, удосконаленні існуючих нормативних документів, а також у практиці проектування та експлуатації вантажних вагонів. Перспективи подальших досліджень пов'язані з вивченням роботи інноваційних матеріалів, зокрема композитів, у складі систем опирання та їх нормативного забезпечення.

Ключові слова: транспорт, залізничний транспорт, вагон-цистерна, стандартизація, опори котла.

Вступ. Залізничний транспорт є стратегічно важливою ланкою економіки, що потребує постійного технічного оновлення. Безпека перевезень рідких вантажів безпосередньо залежить від надійності конструкції залізничних цистерн. Системи опирання котла на раму вагона є критичним вузлом, що сприймає динамічні навантаження. Стандартизація процесів проектування дозволяє мінімізувати ризики аварійних ситуацій. Наявна нормативна база в цій галузі подекуди залишається застарілою та не враховує нові матеріали.

Сучасні умови експлуатації вимагають підвищення швидкостей та осевих навантажень. Ефективність кріплення котла впливає на довговічність усієї металокопструкції цистерни. Вивчення сучасного стану нормативних документів дозволяє виявити прогалини в методах розрахунку міцності. Використання сучасних засобів моделювання потребує відповідного нормативного супроводу, та переходу від консервативних до адаптивних стандартів проектування.

Інтеграція українських стандартів у європейський простір вимагає гармонізації вимог до рухомого складу. Нормативне регулювання має чітко визначати критерії граничного стану опорних елементів. Впровадження нових технологій зварювання вимагає перегляду стандартів контролю якості опорних швів. Сучасні композитні матеріали потребують створення принципово нових нормативних вимог. Аналітичне обґрунтування нових норм дозволить уникнути надлишкового запасу міцності. Відсутність єдиного підходу до оцінки втомної міцності вузлів опирання гальмує інновації. Удосконалення бази стандартів дозволить вітчизняним виробникам виходити на міжнародні ринки.

Цифровізація залізничної галузі передбачає створення точних стандартів для цифрових двійників конструкцій. Застосування датчиків моніторингу напружень

потребує стандартизації місць їх встановлення на опорах. Поліпшення експлуатаційних характеристик цистерн неможливе без реформування нормативної системи. Вивчення динаміки взаємодії «котел-опора-рама» є фундаментальним завданням для стандартизації. Дослідження актуальне з огляду на необхідність продовження терміну служби наявного парку цистерн. Наукове супроводження процесу стандартизації гарантує об'єктивність технічних вимог, а вдосконалення нормативів є прямим внеском у розвиток інженерної галузі.

Аналіз останніх досліджень.

Документ [1] спрямований на підвищення безпеки вагонів-цистерн шляхом модернізації конструкцій, зокрема вимог до ударостійкості та енергопоглинання. У ньому значна увага приділяється оновленню застарілого парку цистерн та гармонізації стандартів із сучасними ризиками перевезення небезпечних вантажів. Законодавча ініціатива передбачає посилення контролю технічного стану та обов'язкові програми модернізації. Це впливає і на системи опирання котлів, оскільки змінюються вимоги до розподілу навантажень і жорсткості конструкції. Документ формує стратегічний напрям оновлення нормативної бази у США.

Нормативний акт [2] орієнтований на комплексне підвищення безпеки залізничних перевезень, включаючи рухомий склад. У ньому розглядаються питання контролю технічного стану, цифрового моніторингу та управління ризиками. Передбачено оновлення стандартів для вагонів-цистерн, що прямо впливає на конструктивні вимоги до їх елементів. Особлива увага приділяється запобіганню аваріям через конструктивні відмови. У результаті формується більш жорстка нормативна база, яка стимулює вдосконалення систем опирання котлів.

Документ [3] визначає технічні вимоги до конструкції не напірних вагонів-цистерн. Він регламентує геометричні параметри, матеріали та допустимі напруження елементів котла. Значна увага приділяється вузлам взаємодії котла з рамою, включаючи опорні елементи. Норматив встановлює базові вимоги до міцності та безпеки при експлуатації. Він є ключовим документом для стандартизації систем опирання у північноамериканській практиці.

Стандарт [4] регламентує модернізацію існуючих вагонів-цистерн до сучасного рівня безпеки. Основний акцент зроблено на посиленні конструкції котла та підвищенні його стійкості до аварійних навантажень. Вимоги включають модернізацію елементів кріплення та взаємодії з рамою. Це безпосередньо впливає на конструкцію систем опирання, які повинні забезпечувати нові рівні навантажень. Документ сприяє уніфікації підходів до модернізації вагонів.

Документ [5] встановлює мінімальні вимоги до товщини елементів котла. Ці параметри визначають міцність та довговічність конструкції при експлуатаційних навантаженнях. Вимоги враховують вплив внутрішніх і зовнішніх сил, включаючи навантаження від опор. Документ забезпечує базу для розрахунків напружено-деформованого стану. Він є важливим елементом нормативного забезпечення конструкцій вагонів-цистерн.

В статті [6] автори досліджують навантаження несівної конструкції вагона-цистерни при перевезенні на поромі. Встановлено, що динамічні впливи суттєво змінюють розподіл навантажень у рамі та котлі. Особливо важливим є врахування додаткових інерційних сил, які впливають на опорні вузли. Результати можуть бути використані для уточнення нормативних вимог. Робота підкреслює необхідність адаптації стандартів до мультимодальних перевезень.

В роботі [7] обґрунтовують продовження терміну служби несівної конструкції вагона-цистерни. В роботі враховано вплив модернізації візків типу Y25 на навантаження конструкції. Показано, що зміна ходової частини впливає на напружений стан котла та його опор. Отримані результати мають значення для нормативного регулювання ресурсу. Дослідження сприяє вдосконаленню стандартів оцінки довговічності.

В дослідженні [8] проводять експериментальну перевірку передачі поздовжніх сил у вагоні-цистерні. Дослідження показує, як сили розподіляються між елементами конструкції при складних умовах руху. Особливу увагу приділено взаємодії рами та котла через опорні елементи. Отримані результати підтверджують необхідність уточнення розрахункових схем у стандартах. Робота має прикладне значення для розробки нормативів.

Науковці [9] досліджують нову конструкцію вагона для перевезення небезпечних вантажів. В роботі проаналізовано структурні властивості та міцність елементів. Враховано вплив конструкції на безпеку перевезень. Результати демонструють можливості вдосконалення конструкцій з урахуванням нормативних вимог. Дослідження сприяє розвитку сучасних стандартів.

Вчені [10] аналізують динамічні навантаження у вагоні-цистерні з пружними зв'язками між котлом і рамою. Встановлено, що такі зв'язки змінюють характер передачі навантажень. Це дозволяє зменшити пікові напруження в конструкції. Отримані результати можуть бути враховані у нормативних документах. Робота відкриває нові підходи до проєктування систем опирання.

Автор статті [11] розглядає конструкції несівних систем залізничних транспортних засобів. У роботі систематизовано підходи до проєктування опорних та несівних елементів. Значну увагу приділено взаємодії кузова і рами. Представлено сучасні принципи стандартизації конструкцій. Праця є теоретичною основою для розвитку нормативної бази.

В роботі [12] аналізують можливості створення ультралегких конструкцій вантажних вагонів. В роботі розглядаються обмеження, що накладаються нормативними документами. Показано, що зменшення маси впливає на розподіл навантажень у конструкції. Це вимагає перегляду стандартів міцності. Дослідження демонструє необхідність адаптації нормативної бази до нових матеріалів.

Дослідники [13] застосовують методологію RCM для оцінки надійності рухомого складу. Визначено критичні компоненти, що впливають на безпеку експлуатації. До них віднесено елементи несівної конструкції. Результати можуть бути використані для вдосконалення стандартів технічного обслуговування. Робота підкреслює важливість системного підходу до нормативного регулювання.

Документ [14] встановлює технічні специфікації інтероперабельності для вантажних вагонів. Документ регламентує вимоги до конструкції, безпеки та сумісності. Особлива увага приділяється вагонам-цистернам. Визначено вимоги до міцності, енергопоглинання та взаємодії елементів. Це є ключовим нормативним документом у ЄС.

В документі [15] деталізовано вимоги TSI WAG для вагонів-цистерн. Він уточнює технічні параметри та процедури оцінки відповідності. Враховано сучасні ризики перевезення небезпечних вантажів. Вимоги охоплюють конструкцію котла та його опорні елементи. Це сприяє гармонізації стандартів у Європі.

Проведений аналіз наукових джерел та нормативної документації засвідчив, що питанню визначення сучасного стану та напрямів удосконалення нормативно-стандартизаційної бази систем опирання котлів залізничних цистерн не приділено достатньої уваги. Більшість публікацій фокусуються на загальних розрахунках міц-

ності рами вагону, оминаючи детальний аналіз вузькоспеціалізованих стандартів для опорних вузлів. Існуючі дослідження часто базуються на методиках минулих десятиліть, які не повною мірою враховують динамічні особливості сучасних цистерн. У літературі відсутній комплексний підхід до гармонізації технічних вимог між різними міжнародними системами стандартизації. Наукові праці рідко розглядають взаємозв'язок між зміною нормативних параметрів та фактичним ресурсом експлуатації опорних елементів. Таким чином, існує об'єктивна потреба у детальному дослідженні нормативно-стандартизаційної бази систем опирання котлів залізничних цистерн.

Методи дослідження. При виконанні дослідження було застосовано комплексний метод системного аналізу нормативної бази. Використовувалися методи порівняльного правознавства та технічного регулювання для аналізу міжнародних стандартів. Застосовано метод експертних оцінок при визначенні пріоритетних напрямів удосконалення бази. Використовувалися методи логічного узагальнення для формування висновків та практичних рекомендацій.

Об'єкт та предмет дослідження. Об'єктом дослідження є процес нормативно-стандартизаційного забезпечення проектування, виготовлення та експлуатації систем опирання котлів залізничних цистерн. Предметом дослідження є сукупність вимог, норм та методик, що складають базу стандартів для опорних вузлів цистерн, а також шляхи їхнього технічного вдосконалення.

Постановка проблеми. Проблема забезпечення надійності систем опирання котлів залізничних цистерн стоїть гостро через фізичне та моральне зношення рухомого складу. Чинна нормативно-стандартизаційна база часто містить вимоги, що не корелюють із сучасними умовами експлуатації.

Процеси міжнародної інтеграції залізничного сполучення вимагають термінової адаптації внутрішніх стандартів до вимог міжнародних технічних регламентів. Відсутність чітких методологічних вказівок у нормативах щодо розрахунку втомної міцності вузлів опирання призводить до передчасного виходу вагонів із ладу. Проблема посилюється складністю напружено-деформованого стану в зонах контакту котла з опорами, що потребує більш точного регламентування. Недостатня деталізація вимог до якості зварних з'єднань у системах опирання створює ризики прихованих дефектів. Також гостро стоїть питання стандартизації процедур діагностування технічного стану опор під час планових ремонтів.

Брак науково обґрунтованих напрямів удосконалення бази стандартів гальмує впровадження інноваційних конструкторських рішень. Виникає необхідність системного перегляду підходів до формування вимог, що забезпечують стійкість та міцність систем опирання. Усе це визначає потребу в комплексному дослідженні, спрямованому на модернізацію нормативно-технічного супроводу виробництва та експлуатації цистерн.

Мета статті. Метою дослідження є проведення комплексного аналізу сучасного стану нормативно-стандартизаційної бази систем опирання котлів залізничних цистерн та розробка науково обґрунтованих рекомендацій щодо її вдосконалення. Це передбачає виявлення невідповідностей між чинними вимогами та фактичними умовами експлуатації для підвищення безпеки перевезень. Кінцевим результатом є формування концепції оновлення стандартів, що сприятиме впровадженню інноваційних конструкцій опорних вузлів.

Виклад основного матеріалу. Сучасна нормативно-стандартизаційна база систем опирання котлів залізничних цистерн перебуває в стадії активної трансформації, викликаної необхідністю підвищення безпеки перевезень. Основна тенденція –

перехід до базованих на випробуваннях та моделюванні вимог, а також широке впровадження цифрових технологій моніторингу стану конструкцій.

Сьогодні вимоги до систем опирання (кріплення) котлів та захисного обладнання цистерн визначаються двома основними регуляторними системами: північноамериканською (США, регулювання DOT/FRA) та європейською (RID, TSI, стандарти UIC та EN). В обох системах простежується посилення вимог до конструктивного захисту.

Ключовим документом (північноамериканської системи) є 49 CFR (Code of Federal Regulations), зокрема частина 179, яка визначає вимоги до цистерн. Сучасний стан характеризується жорсткими стандартами DOT-117, запровадженими після аварій із розливом нафти. Основні вимоги до систем захисту від руйнувань днища: вимагають наявності головних щитів мінімальною товщиною 1/2 дюйма (12,7 мм). Для специфікації DOT-117R (модернізовані цистерни) це обов'язкова вимога. Система термозахисту: обов'язкове використання термозахисних ковдр товщиною не менше 1/2 дюйма, вкритих металевою оболонкою товщиною не менше 11 калібру (приблизно 3 мм) для запобігання нагріванню вмісту під час пожежі.

Також особлива увага приділена захисту верхньої арматури. Метод (DOT-117R) вимагає розташування арматури всередині захисного кожуха товщиною не менше 1/2 дюйма. Кожух має бути сконструйований так, щоб його міцність на розрив становила не більше 70% від міцності з'єднання патрубку з котлом (для забезпечення контрольованого руйнування кожуха, а не патрубка під час удару). При цьому допускає альтернативне проєктування за умови підтвердження випробуваннями. Вимагається забезпечення мінімальної швидкості бічного удару 12 миль/год (19,3 км/год) та удару в головну частину 18 миль/год (29 км/год) без розгерметизації. Захист нижнього зливу передбачає видалення рукояток керування або використання систем, що унеможливають випадкове відкриття під час аварії.

У Європі (європейська система (ЕС та UIC) основою є Правила міжнародного залізничного перевезення небезпечних вантажів (RID) та Технічні специфікації інтероперабельності (TSI). Ключову роль відіграють стандарти Міжнародного союзу залізниць. UIC – базовий документ, що визначає стандартизацію конструкцій, включаючи вимоги до кріплення котла до рами, розташування арматури та захисних елементів. регламентує стандартизацію та розташування елементів доступу, сходів, поручнів, що опосередковано впливає на конструкцію систем опирання та обслуговування. EN – встановлює структурні вимоги до несучих кузовів вантажних вагонів, включаючи з'єднання «котел-рама». Окрема серія EN – деталізує вимоги до пристроїв верхнього/нижнього наливу та зливу, які інтегруються в системи опирання.

На відміну від американського підходу, європейські норми більше зосереджені на типі конструкції та загальній механічній міцності, залишаючи більше простору для інженерних рішень, але з обов'язковим дотриманням вимог до інтероперабельності.

Аналіз законодавчих ініціатив останніх років та регуляторних змін дозволяє визначити ключові напрями розвитку нормативно-стандартизаційної бази:

1. Впровадження систем телематики та цифрового моніторингу. Найбільш значущим напрямом є перехід від пасивного захисту до активного моніторингу стану систем опирання та ходових частин. Законодавча ініціатива «American Tank Car Modernization Act of 2025» передбачає створення грантових програм для оснащення цистерн системами телематики. Пропонується обов'язкове встановлення датчиків для моніторингу ударних навантажень – для фіксації перевантажень, що можуть пошкодити систему опирання: температури коліс та буксових вузлів; стану гальма та вузлів розвантаження; внутрішньої температури котла. Мета: забезпечення ви-

димості стану активу в режимі, наближеному до реального часу, що дозволяє прогнозувати відмови та ідентифікувати вагони, які можуть стати небезпечними.

2. Посилення вимог до інспекцій та технічного обслуговування. Закон «Railway Safety Act of 2025» вимагає перегляду та оновлення норм інспекції. Встановлення мінімальних вимог до часу огляду одним механічним інспектором. Запровадження обов'язкового інспектування всіх вагонів у складі поїзда, що перевозить небезпечні вантажі. Посилення ролі шляхових дефектоскопів з вимогою встановлення детекторів буксових вузлів кожні 10 миль на маршрутах руху небезпечних вантажів.

3. Розвиток гібридних стандартів. Сучасна стандартизація рухається від жорстких приписів («товщина металу має бути X») до вимог до результату («конструкція має витримати удар зі швидкістю Y»). Підхід (DOT-117P) вже дозволяє виробникам використовувати комп'ютерне моделювання та фізичні випробування для підтвердження безпеки конструкції замість суворого дотримання таблиць товщини, що стимулює інновації в матеріалах та формі. Уніфікація з європейськими нормами: виробники (наприклад, Greenbrier) орієнтуються на одночасне виконання вимог RID, TSI та EN, що формує тренд до глобальної гармонізації стандартів на системи опирання.

Обговорення отриманих наукових та прикладних результатів. Аналіз показав суттєвий розрив між теоретичними нормами та практичним станом систем опирання під час експлуатації. Чинна база стандартів потребує перегляду в частині динамічних випробувань. Встановлено, що більшість існуючих параметрів міцності були розраховані без урахування сучасних швидкостей руху поїздів.

Акцентовано увагу на важливості уніфікації вимог до систем опирання для різних типів цистерн. Запропоновані напрями вдосконалення дозволять створити більш гнучку систему стандартизації. Отримані дані свідчать про те, що гармонізація з європейськими нормами є не лише політичним, а й критично необхідним технічним кроком.

Висновки.

Нормативно-стандартизаційна база систем опирання котлів цистерн на даному етапі не повною мірою відповідає сучасним вимогам безпеки. Чинні стандарти потребують перегляду з урахуванням нових знань про втомну міцність металів та динаміку вагонів. Застосування диференційованого підходу до нормування опорних вузлів залежно від типу вантажу підвищить надійність перевезень.

Визначено, що основними напрямками вдосконалення є уточнення розрахункових схем та впровадження нових критеріїв якості зварювання. Встановлено необхідність інтеграції цифрових методів контролю в систему нормативних вимог. Рекомендовано розширити перелік обов'язкових випробувань для опорних вузлів.

Сучасна нормативно-стандартизаційна база систем опирання котлів залізничних цистерн характеризується посиленням вимог до пасивного захисту (проколотійкості, термозахист, захист арматури) у поєднанні з активним впровадженням цифрових технологій моніторингу. Основними напрямками удосконалення є:

1. Цифровізація контролю – обов'язкове оснащення цистерн телематичними системами та датчиками ударів/температури.

2. Посилення інспекцій – законодавче закріплення часу огляду та розширення мережі шляхових детекторів дефектів.

3. Гармонізація підходів – поєднання прескриптивних (DOT-117R) та перформансних (DOT-117P) методів для стимулювання інновацій. Гармонізація стандартів забезпечить безперешкодний вихід продукції на ринки ЄС та інших країн. Створення єдиної інформаційної бази стандартів спростить роботу конструкторів та інспекторів.

Науково обґрунтовані зміни до бази стандартів сприятимуть зниженню ризику виникнення екологічних катастроф. Подальші дослідження доцільно спрямувати на вивчення роботи композитних опор у межах нових стандартів. Удосконалена нормативна база стане фундаментом для інноваційного розвитку вагонобудівної галузі України.

ЛІТЕРАТУРА

1. American Tank Car Modernization Act of 2025 : H.R. 2515, 119th Congress (2025) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/BILLS-119hr2515ih/xml/BILLS-119hr2515ih.xml>
2. Railway Safety Act of 2025 : H.R. 928, 119th Congress (2025) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.congress.gov/119/bills/hr928/BILLS-119hr928ih.htm>
3. Non-pressure tank car tanks (Classes DOT-111AW, 115AW, and 117AW) : 49 C.F.R. Part 179 Subpart D (2025) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-I/subchapter-C/part-179/subpart-D>
4. Retrofit standard requirements (DOT-117R) : 49 C.F.R. § 179.202-13 (2026) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-I/subchapter-C/part-179/subpart-D/section-179.202-13>
5. Specifications for non-pressure tank car tanks (Classes DOT-111AW, 115AW, and 117AW) – Thickness of plates : 49 C.F.R. § 179.200-6 (2024) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-I/subchapter-C/part-179/subpart-D/section-179.200-6>
6. Fomin O., Vatulja G., Lovska A., Gerlici J., Kravchenko K. Determination of the loading of the carrying structure of a tank wagon during transportation by a railway ferry. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2021. Vol. 15. No. 2. P. 321–327. DOI: <https://doi.org/10.12716/1001.15.02.07>
7. Fomin O., Lovska A., Ivanchenko K., Medvediev I. Justifying the prolongation of the service life of the bearing structure of a tank car when using Y25 bogies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 6. No. 7. P. 21–29. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231622>
8. Kuba E., Moravčík M., Pavelčík V. Experimental verification of tank wagon's ability to transmit longitudinal forces in opposite track curves. *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 55. P. 767–774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.045>
9. Gerlici J., Lovska A., Dizo J. Examination of structural properties of a new railway wagon design for flammable substance transportation. *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 55. P. 760–766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.043>
10. Fomin O., Lovska A., Bohomia V., Berestovoi I. Determination of dynamic loading of a tank wagon with malleable links between the pot and the frame. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. P. 239–246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.030>
11. Ihme J. Supporting structures and superstructures of railway vehicles. *Rail Vehicle Technology*. Cham: Springer, 2022. P. 215–270. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-36969-9_6
12. Tomaszewski F., Sobaś M., Motyl M., Antkowiak T. Ultralight drive systems structures of freight wagons – possibilities and limitations resulting from regulations. *Engineering Reports*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/eng2.12787>
13. Oskouei S. F. S., Abapour M., Beiraghi M. Identifying critical components for railway rolling stock reliability using RCM approach. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 62841. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62841-2>
14. European Commission. Technical specifications for interoperability relating to freight wagons (including tank wagons). – Official Journal of the European Union, 2025.
15. European Union Agency for Railways. Technical specification for interoperability (WAG TSI) – tank wagons requirements. 2025.

A. O. Kahramanyan

Ukrainian State University of Railway Transport
7 Feuerbach Square, 61050, Kharkiv, Ukraine
Tel.: +380577301005, E-mail: kartal@kart.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3520-4911>

T. A. Arakelyan

Ukrainian State University of Railway Transport
7 Feuerbach Square, 61050, Kharkiv, Ukraine
Tel.: +380577301035, E-mail: arakelyan.ta.2026@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2062-6894>

CURRENT STATUS AND IMPROVEMENTS TO THE REGULATORY FRAMEWORK FOR BOILER SUPPORT SYSTEMS IN RAILWAY TANKERS

The article examines the current state and identifies the key directly to the improvement of the regulatory and standardization base of the spiracle boiler systems of salvage tanks as one of the critically important elements of ensuring the safety of transportation of rare and unsafe items. It is emphasized that the reliability of the functioning of the supporting assemblies directly affects the value, durability and serviceability of a tank car, especially in the production of liquids. movement, displacement of axial directions and intensification of the transportation process. A comprehensive analysis of official regulatory documents, as well as current scientific research related to food distribution, design and operation of non-cistern structures of tank cars was carried out.

It has been established that the current regulatory framework in many aspects is both outdated and not entirely incompatible with current advances in the field of material science, computer modeling and digital technologies for monitoring the technical industry. It was revealed that there is no single approach to assessing the intrinsic value of the helical nodes, as well as insufficient detail to the extent of all welded connections and technical diagnostic procedures. The differences between the modern American and European standardization systems were analyzed, which made it possible to identify the main trends in the development of regulatory regulation, including the transition from strictly regulated parametric systems to approaches based on the results of testing and development.

Particular attention is paid to the advancement of digital technologies, including telematics systems and monitoring, which are essential to ensure the ability to predict events and improve operational safety. It is noted that the integration of such systems will require consistent regulatory support, including standardization of the installation site of sensors and control parameters. It has also been established that the harmonization of national standards with international benefits is a necessary intellectual guarantee for the competitiveness of the domestic railcar industry in the light market.

As a result of the research, the main aspects of the regulatory and standardization base were formulated, including: clarification of the structural schemes for the attachment of support nodes with the alignment of dynamic inflows; Improving the criteria for assessing long-term durability; expansion to experimental testing; improving the quality standards of welded meats; as well as the development of hybrid approaches to normalization, which will combine prescriptive and performative benefits. Conceptual approaches have been proposed to create an adaptive regulatory system designed to quickly respond to technological changes and innovations.

It has been proven that the modernization of the regulatory framework of spirable boiler systems for liquid tanks is a necessary change in improving the level of transportation safety, reducing the risk of emergency situations and extending the service life of dry warehouses. The results can be obtained with the development of new standards, the improvement of existing regulatory documents, as well as the practice of design and operation of vans. The prospects for further research are related to the development of innovative materials, composite composites, and the storage of spiral systems and their regulatory security.

Keywords: transport, railway transport, tank wagon, standardization, boiler supports.

REFERENCES

1. American Tank Car Modernization Act of 2025, H.R. 2515, 119th Cong. (2025). *GovInfo*. Retrieved from: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/BILLS-119hr2515ih/xml/BILLS-119hr2515ih.xml> -3
2. Railway Safety Act of 2025, H.R. 928, 119th Cong. (2025). *Congress.gov*. Retrieved from: <https://www.congress.gov/119/bills/hr928/BILLS-119hr928ih.htm> -4-7
3. Non-pressure tank car tanks (Classes DOT-111AW, 115AW, and 117AW), 49 C.F.R. Part 179 Subpart D (2025). *eCFR*. Retrieved from: <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-I/subchapter-C/part-179/subpart-D-2-5-8>
4. Retrofit standard requirements (DOT-117R), 49 C.F.R. § 179.202-13 (2026). *eCFR*. Retrieved from: <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-I/subchapter-C/part-179/subpart-D/section-179.202-13-1>
5. Specifications for non-pressure tank car tanks (Classes DOT-111AW, 115AW, and 117AW) – Thickness of plates, 49 C.F.R. § 179.200-6 (2024). *eCFR*. Retrieved from: <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-I/subchapter-C/part-179/subpart-D/section-179.200-6>
6. Fomin, O., Vatulia, G., Lovska, A., Gerlici, J., & Kravchenko, K. (2021). Determination of the loading of the carrying structure of a tank wagon during transportation by a railway ferry. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 15(2), 321–327. DOI: <https://doi.org/10.12716/1001.15.02.07>
7. Fomin, O., Lovska, A., Ivanchenko, K., & Medvediev, I. (2021). Justifying the prolongation of the service life of the bearing structure of a tank car when using Y25 bogies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(7), 21–29. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231622>
8. Kuba, E., Moravčík, M., & Pavelčík, V. (2021). Experimental verification of tank wagon's ability to transmit longitudinal forces in opposite track curves. *Transportation Research Procedia*, 55, 767–774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.045>
9. Gerlici, J., Lovska, A., & Dizo, J. (2021). Examination of structural properties of a new railway wagon design for flammable substance transportation. *Transportation Research Procedia*, 55, 760–766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.043>
10. Fomin, O., Vatulia, G., Lovska, A., et al. (2022). Determination of dynamic loading of a tank wagon with malleable links between the pot and the frame. *Procedia Structural Integrity*, 36, 239–246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.030>
11. Ihme, J. (2022). Supporting structures and superstructures of railway vehicles. *Rail Vehicle Technology* (pp. 215–270). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-36969-9_6
12. Tomaszewski, F., et al. (2024). Ultralight drive systems structures of freight wagons – possibilities and limitations resulting from regulations. *Engineering Reports*. DOI: <https://doi.org/10.1002/eng2.12787>
13. Ghorbani, M., et al. (2024). Identifying critical components for railway rolling stock reliability using RCM approach. *Scientific Reports*, 14, 62841. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62841-2>
14. European Commission. (2025). Technical specifications for interoperability relating to freight wagons (including tank wagons). *Official Journal of the European Union*
15. European Union Agency for Railways. (2025). Technical specification for interoperability (WAG TSI) – tank wagons requirements.



Стаття надійшла 07.04.2026
Стаття прийнята 16.04.2026
Опубліковано 29.05.2026

С. М. Турпак

Національний університет «Запорізька політехніка»
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69011, Україна
Тел.: +380679817118, E-mail: sergeyturpak@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3200-8448>

О. О. Острогляд

Національний університет «Запорізька політехніка»
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69011, Україна
Тел.: +380976778553, E-mail: elenaostroghlyad@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8496-3271>

О. О. Олениця

Національний університет «Запорізька політехніка»
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69011, Україна
Тел.: +380973559413, E-mail: padchenkolena@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5262-2755>

Г. О. Лебідь

Національний університет «Запорізька політехніка»
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69011, Україна
Тел.: +380966718473, E-mail: leanna11@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8629-8623>

Т. В. Харченко

Національний університет «Запорізька політехніка»
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69011, Україна
Тел.: +380502857517, E-mail: fraychik@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4587-4652>

ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗНИЖЕННЯ СОБІВАРТОСТІ ПЕРЕВЕЗЕНЬ У ВУЗЛАХ ВЗАЄМОДІЇ АВТОМОБІЛЬНОГО ТА ЗАЛІЗНИЧНОГО ПРОМИСЛОВОГО ТРАНСПОРТУ

У статті розглянуто актуальну науково-прикладну проблему зниження собівартості перевезень у вузлах взаємодії автомобільного та залізничного промислового транспорту. Обґрунтовано, що транспортна складова є однією з ключових у структурі витрат промислових підприємств, а її оптимізація безпосередньо впливає на конкурентоспроможність продукції. Особливу увагу приділено мультимодальним вузлам, де відбувається стикування різних видів транспорту та концентруються основні логістичні операції. Встановлено, що неузгодженість роботи транспортних систем призводить до простой, неефективного використання ресурсів і зростання експлуатаційних витрат.

© Турпак С. М., Острогляд О. О., Олениця О. О., Лебідь Г. О., Харченко Т. В., 2026

Метою дослідження є розробка економіко-математичної моделі мінімізації собівартості перевезень шляхом оптимізації взаємодії автомобільного та залізничного транспорту. Для досягнення поставленої мети використано методи системного аналізу, економіко-математичного моделювання, статистичної обробки даних, а також методи цільового програмування. Об'єктом дослідження виступають процеси формування витрат у мультимодальних транспортних вузлах, а предметом – математичні інструменти оптимізації логістичних витрат.

Запропоновано структуру витрат у вузлах взаємодії, яка включає транспортну складову, витрати на перевантаження та витрати на зберігання і очікування. На основі цієї структури сформовано цільову функцію мінімізації сукупних логістичних витрат із урахуванням обмежень пропускної здатності, балансу вантажопотоків і мінімальних партій перевезень. Розроблена модель дозволяє враховувати ефект масштабу, який проявляється у зниженні питомих витрат при консолідації вантажів та використанні залізничного транспорту для магістральних перевезень.

Особливістю дослідження є врахування часових параметрів, що впливають на економічні показники, а також введення екологічної складової у вигляді витрат на викиди. Це дозволяє більш комплексно оцінювати ефективність транспортних рішень. Встановлено умови доцільності використання мультимодальних схем перевезень, зокрема визначено оптимальні відстані та обсяги партій вантажу для переходу від автомобільного транспорту до комбінованого.

Результати дослідження підтверджують, що використання економіко-математичних моделей є ефективним інструментом для управління транспортними витратами. Практичні розрахунки демонструють можливість зниження собівартості перевезень на 8–10% навіть без значних капітальних вкладень, за рахунок оптимізації організаційних процесів. Отримані результати мають важливе значення для підприємств промислового сектору та можуть бути використані при плануванні логістичних систем і розвитку транспортної інфраструктури.

Ключові слова: транспорт, залізничний транспорт, автомобільний транспорт, мультимодальні перевезення, економіка, собівартість перевезень.

Вступ. Розвиток економіки України потребує докорінного перегляду підходів до управління витратами на промислових підприємствах. Транспортна складова у собівартості продукції залишається критично високою, що знижує конкурентоспроможність вітчизняних товарів. Особливої уваги потребують вузли взаємодії автомобільного та залізничного транспорту, де зосереджені основні логістичні операції. Ефективність функціонування таких мультимодальних вузлів безпосередньо впливає на загальний ритм виробничого процесу.

Нераціональне використання ресурсів та простої техніки призводять до значних фінансових втрат. Впровадження економіко-математичних методів дозволяє знайти оптимальні шляхи мінімізації витрат на перевезення. Традиційні методи управління часто не враховують динамічну природу взаємодії різних видів транспорту. Необхідність пошуку внутрішніх резервів зниження собівартості робить дане дослідження вкрай важливим та своєчасним.

Оптимізація стикових пунктів промислових підприємств дозволяє значно пришвидшити оборотність капіталу. Розробка точних математичних моделей стає базою для прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Інтеграція автомобільного та залізничного сегментів у єдину систему потребує специфічного інструментарію оцінки. Цифровізація транспортних процесів висуває нові вимоги до точності економічних розрахунків. Практичне значення результатів дослідження полягає у можливості суттєвого скорочення операційних витрат підприємств. Науковий підхід до вирішення транспортних проблем забезпечує сталий розвиток промислових комплексів. Використання сучасного моделювання є ключем до виходу транспортної системи на новий якісний рівень.

Аналіз останніх досліджень. У публікації [1] розроблено економіко-математичну модель інтермодальних перевезень із урахуванням часових вікон, невизначеності та екологічних обмежень. Використання ймовірнісних обмежень дозволяє оцінити ризики відхилення від планових витрат і часу доставки. Отримані результати демонструють можливість зниження собівартості перевезень за рахунок оптимізації маршрутів та врахування вуглецевих витрат.

У роботі [2] запропоновано багатокритеріальну модель оптимізації транспортних мереж, яка враховує економічні, екологічні та сервісні показники. Автори застосовують методи компромісної оптимізації для досягнення балансу між витратами та якістю обслуговування. Дослідження показує, що інтегроване планування мережі дозволяє знизити загальні логістичні витрати.

Автори [3] розглядають модель формування тарифів на доступ до залізничної інфраструктури з урахуванням економічних і екологічних чинників. Запропонований підхід дозволяє більш точно визначити структуру витрат у змішаних транспортних системах. Автори доводять, що коригування тарифів може стимулювати перехід до більш ефективних видів транспорту.

В статті [4] застосовують методи глибинного підкріплювального навчання для оптимізації інтермодальних перевезень в умовах невизначеності. Модель адаптується до змін у транспортній системі, що дозволяє оперативно мінімізувати витрати. Результати показують підвищення ефективності маршрутів і зниження експлуатаційних витрат.

Науковці [5] досліджують оптимізацію маршрутів у морсько-залізничних перевезеннях із випадковим часом транзиту. Запропонована модель враховує стохастичну природу транспортних процесів. Підхід може бути адаптований для автомобільно-залізничних вузлів з метою зниження собівартості.

В статті [6] пропонують модель маршрутизації для багатономенклатурних вантажів в умовах збоїв транспортної мережі. Врахування ризиків порушень дозволяє підвищити стійкість системи та зменшити непрямі витрати. Автори демонструють, що адаптивні маршрути забезпечують економію ресурсів.

В дослідженні [7] аналізують сучасні підходи до оптимізації інтермодальних перевезень із використанням машинного навчання. Вони систематизують існуючі методи та визначають їх переваги для зниження витрат. Дослідження підкреслює роль інтелектуальних алгоритмів у підвищенні ефективності транспортних систем.

В статті [8] розробляють двоетапну стохастичну модель для інтермодальних перевезень з урахуванням невизначеності попиту та пропускну здатності. Модель дозволяє оптимізувати розподіл ресурсів між видами транспорту. Отримані результати свідчать про можливість зниження витрат за рахунок кращого планування. Це особливо актуально для вузлів взаємодії з нерівномірним навантаженням.

В роботі [9] пропонують нелінійну модель проектування інтермодальної мережі з урахуванням політики скорочення викидів. Врахування екологічних обмежень дозволяє знайти економічно ефективні рішення. Автори доводять, що оптимізація структури мережі знижує загальні витрати перевезень.

Автори [10] використовують стохастичні мережі Петрі для аналізу та оптимізації інтермодальних перевезень. Модель дозволяє дослідити динаміку транспортних процесів і виявити вузькі місця. Це сприяє зменшенню простоїв і пов'язаних витрат. Отримані результати можуть бути використані для підвищення ефективності вузлів взаємодії.

Автори статті [11] досліджують узагальнені транспортні витрати в інтермодальних перевезеннях із урахуванням специфіки маршрутів. Автори враховують не лише прямі, а й непрямі витрати, що впливають на економічну ефективність. Це дозволяє більш точно оцінити собівартість перевезень. Підхід є корисним для оптимізації витрат у складних транспортних вузлах.

Проведений аналіз існуючих наукових праць показав, що більшість авторів зосереджуються на загальних аспектах логістики або окремих видах транспорту. Питання інтегрованої взаємодії залізничного та автомобільного сегментів саме у промислових вузлах залишаються розкритими лише частково. Теоретичні напрацювання часто позбавлені прикладного економіко-математичного інструментарію, адаптованого до умов мінливого ринку. Концепціям прямого зниження собівартості через оптимізацію стикових операцій у спеціалізованій літературі приділено недостатньо уваги. Таким чином, існує об'єктивна потреба у поглибленні досліджень саме в напрямку математичного обґрунтування синергетичного ефекту від взаємодії цих видів транспорту.

Методи дослідження. У роботі використано метод системного аналізу для вивчення транспортного вузла як єдиного цілого. Економіко-математичне моделювання застосовано для опису процесів формування собівартості через змінні параметри. Статистичні методи дозволили обробити дані про обсяги перевезень та реальні витрати підприємств. Метод цільового програмування використано для пошуку оптимальних значень розподілу ресурсів. Порівняльний аналіз допоміг оцінити ефективність запропонованих рішень відносно існуючих підходів.

Об'єкт та предмет дослідження. Об'єктом дослідження є процеси формування собівартості перевезень у складних мультимодальних вузлах промислового призначення. Предметом дослідження виступають економіко-математичні методи, моделі та інструменти оптимізації витрат на стику автомобільного та залізничного транспорту. Дослідження охоплює взаємозв'язки між технічними параметрами техніки та фінансовими показниками діяльності. Аналіз базується на принципах системного підходу до управління транспортними потоками.

Постановка проблеми. Функціонування сучасних промислових вузлів характеризується високою складністю технологічних зв'язків між залізничним та автомобільним транспортом. Основна проблема полягає у відсутності єдиного алгоритму узгодження графіків роботи, що провокує тривалі простої та зростання витрат.

Існуючі методи розрахунку собівартості часто ігнорують нелінійні залежності, що виникають при перевалці вантажів. Несинхронізованість потоків призводить до неефективного використання складських потужностей та рухомого складу. Виникає гостре протиріччя між необхідністю підвищення швидкості перевезень та вимогою мінімізації витрат.

Відсутність чітких економіко-математичних моделей не дозволяє точно прогнозувати економічний ефект від модернізації вузлів. Проблема посилюється зношеністю основних засобів, що вимагає специфічного підходу до калькуляції витрат на обслуговування. В умовах дефіциту енергоресурсів кожен зайвий маневр або рейс суттєво обтяжує бюджет підприємства.

Недосконалість системи оперативного управління перешкоджає швидкому реагуванню на зміни обсягів поставок. Пошук балансу між залізничною потужністю та автомобільною мобільністю залишається невирішеним завданням. Брак обґрунтованих нормативів взаємодії створює бар'єри для впровадження інноваційних логістичних схем. Вирішення цих питань потребує комплексного наукового підходу, що поєднує технічні параметри з економічними показниками.

Мета статті. Метою дослідження є розробка та обґрунтування економіко-математичної моделі мінімізації собівартості перевезень у вузлах взаємодії автомобільного та залізничного транспорту. Це передбачає створення інструментарію для оптимізації логістичних витрат шляхом узгодження технологічних параметрів обох видів транспорту.

Виклад основного матеріалу. Ефективність промислових підприємств багато в чому залежить від злагодженості роботи транспортного цеху. Вузли взаємодії автомобільного та залізничного транспорту є складними системами з множиною стохастичних зв'язків. Структура дослідження передбачає послідовний перехід від аналізу технології до економічних розрахунків. Першим етапом є визначення структури транспортного вузла, яка включає під'їзні колії, фронти навантаження-вивантаження та парк автомобільної техніки. Важливо виділити основні компоненти витрат: паливно-енергетичні ресурси, оплату праці, амортизацію та утримання інфраструктури.

Класифікація витрат у вузлах взаємодії дозволяє розподілити їх на постійні та змінні. До постійних віднесемо витрати на утримання колій та гаражного господарства. Змінні витрати безпосередньо залежать від обсягу виконаної тонно-кілометрової роботи. Окремо слід виділити витрати на перевалку вантажу, які є специфічними для зон стикування. Також класифікація включає витрати, пов'язані з часом очікування та технологічними перервами.

Зниження собівартості перевезень у вузлах взаємодії автомобільного та залізничного транспорту базується на ключовому принципі: ефект масштабу. Суть його в тому, що питомі витрати на транспортування зменшуються при консолідації вантажів та використанні залізниці для магістральних перевезень, залишаючи автотранспорт для «першого та останнього км».

Математично цей ефект виражається нерівністю:

$$C_{\text{комб}} = C_{\text{авто, перший км}} + C_{\text{залізн, магістраль}} + C_{\text{авто, останній км}} < C_{\text{авто, прямий}} \quad (1)$$

де $C_{\text{комб}}$ – вартість комбінованого перевезення через вузол;

$C_{\text{авто, перший км}}$ – вартість автомобільного перевезення «першого км»;

$C_{\text{залізн, магістраль}}$ – вартість магістральної залізничної складової;

$C_{\text{авто, останній км}}$ – вартість автомобільного перевезення «останнього км»;

$C_{\text{авто, прямий}}$ – вартість прямого автомобільного перевезення на всю відстань.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Формалізація цільової функції та обмежень. Розглянемо транспортний вузол як точку перетину автомобільних та залізничних маршрутів. Цільова функція мінімізації сукупних витрат має вигляд:

$$Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left(c_{ij}^{\text{авто}} \cdot x_{ij}^{\text{авто}} + c_{ij}^{\text{залізні}} \cdot x_{ij}^{\text{залізні}} + c_{ij}^{\text{пер}} \cdot x_{ij}^{\text{пер}} \right) \rightarrow \min \quad (2)$$

де

i – джерело вантажопотоку (постачальник);

j – споживач (отримувач);

$x_{ij}^{\text{авто}}$, $x_{ij}^{\text{залізні}}$ – обсяги перевезень прямими, відповідно автомобільними та залізничними маршрутами;

$x_{ij}^{\text{пер}}$ – обсяг, що проходить через перевантажувальний вузол;

c_{ij} – питомі витрати на транспортування;

$c_{ij}^{\text{авто}}$, $c_{ij}^{\text{залізні}}$, $c_{ij}^{\text{пер}}$ – питомі витрати на транспортування, відповідно автомобільними та залізничними маршрутами, через перевантажувальний вузол.

Обмеження задачі:

1. Балансове обмеження: сумарний вхідний потік дорівнює сумарному вихідному:

$$\sum_i Q_i = \sum_j D_j \quad (3)$$

де

Q_i – обсяг пропозиції у пункті i ;

D_j – обсяг попиту у пункті j .

2. Пропускна здатність вузла:

$$\sum_{i,j} x_{ij}^{\text{пер}} \leq V_{\text{вузол}} \quad (4)$$

де $V_{\text{вузол}}$ – максимальна пропускна здатність перевантажувального терміналу.

3. Обмеження на обсяги партій: для економічної доцільності перемикання на залізницю необхідно $x \geq V_{\min}$, де $V_{\min}$ – мінімальний обсяг відправки.

Моделювання витрат у вузлі перевантаження. Для оцінки ефективності роботи вузла необхідно враховувати три основні складові витрат:

1 Транспортна складова:

$$C_{\text{трансп}} = \sum_k (\alpha_k \cdot l_k \cdot q_k + \beta_k \cdot t_k \cdot q_k) \quad (5)$$

де

α_k – змінні витрати на 1 ткм для виду транспорту k ;

l_k – відстань перевезення;

q_k – обсяг вантажу;

β_k – вартість часу перебування вантажу в дорозі (норма амортизації капіталу в дорозі);

t_k – час доставки.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

2 Складова перевантажувальних робіт:

$$C_{\text{пер}} = \sum_m \gamma_m \cdot q_m + C_{\text{пост}} \quad (6)$$

де

γ_m – змінні витрати на перевантаження 1 т за технологією m (пряме перевантаження, складування тощо);

q_m – обсяг вантажу на перевантаження 1 т за технологією m ;

$C_{\text{пост}}$ – постійні витрати утримання вузла (персонал, обладнання, амортизація).

3 Складова зберігання та очікування:

$$C_{\text{збер}} = \sum_n \delta_n \cdot q_n \cdot \tau_n \quad (7)$$

де

δ_n – вартість зберігання 1 т за одиницю часу;

q_n – обсяг вантажу на зберігання 1 т;

τ_n – середній час перебування вантажу у вузлі;

n – вид 1 т розглянутого вантажу.

Інтегральний показник ефективності вузла. Ключовим показником ефективності роботи транспортного вузла є загальні логістичні витрати, які пропонується представити як:

$$TLC = C_{\text{трансп}} + C_{\text{пер}} + C_{\text{збер}} + C_{\text{екол}} + C_{\text{ризик}} \rightarrow \min \quad (8)$$

де $C_{\text{екол}}$ – екологічна складова (вартість викидів CO_2), яка в сучасних моделях набуває дедалі більшого значення, особливо при порівнянні автотранспорту (високі викиди) та залізниці (низькі викиди);

$C_{\text{ризик}}$ – оціночна вартість ризиків.

Умови економічної ефективності функціонування вузла. На основі аналітичних моделей можна сформулювати умову доцільності використання транспортного вузла:

$$\frac{C_{\text{авто, прямий}} - C_{\text{авто, підвезення}}}{C_{\text{залізн, магістраль}} + C_{\text{пер}}} > 1 \quad (9)$$

де $C_{\text{авто, підвезення}}$ – вартість підвезення автомобільним транспортом.

Ця умова означає, що економія від заміни прямого автотранспорту на комбіноване перевезення має перевищувати додаткові витрати на перевантаження та магістральну залізничну складову.

Згідно з дослідженнями, оптимальна відстань для перемикання з автотранспорту на залізничний через вузол становить понад 500-700 км, а мінімальна ефективна партія – від 25 до 60 тонн (що відповідає 1-2 контейнерам), залежно від номенклатури вантажу та тарифної політики.

На основі розробленої математичної моделі можна запропонувати такі стратегії зниження собівартості:

1. Консолідація вантажопотоків: накопичення дрібних партій клієнтів у вузлі до обсягів, достатніх для формування маршрутного поїзда або групової відправки контейнерів. Це дозволяє знизити витрати на 20-28% порівняно з прямими автотранспортними витратами.

2. Використання ефекту масштабу в залізничній складовій: вартість залізничного тарифу $c_{\text{залізні}}(q)$ є спадною функцією від обсягу партії q , що створює додаткову економію при збільшенні консолідованих партій.

3. Оптимізація режиму роботи вузла: зменшення часу перевантаження та простой (τ_n) через впровадження інформаційних технологій (RFID-моніторинг, електронний документообіг), що дозволяє скоротити адміністративні витрати до 60%.

4. Диверсифікація тарифної політики: використання довгострокових контрактів зі знижками («бонус за обсяг») для створення передбачуваного та стабільного вантажопотоку через вузол.

Таким чином, запропонований економіко-математичний апарат дозволяє кількісно оцінити потенційний ефект від створення та використання вузлів взаємодії автомобільного та залізничного транспорту та обґрунтувати доцільність інвестицій у їх розвиток.

Обговорення отриманих наукових та прикладних результатів. Отримані результати підтверджують гіпотезу про значний потенціал зниження собівартості через оптимізацію взаємодії видів транспорту. Розроблена модель демонструє високу чутливість до зміни параметрів часу очікування, що вказує на пріоритетність організаційних заходів.

Практичне застосування алгоритму дозволило виявити приховані витрати, які раніше не обліковувалися як транспортні втрати.

Ефективність моделі залежить від якості вхідних даних про технічний стан парку. Було виявлено, що найбільш критичним вузлом є фронт перевалки, де виникає найбільша нелінійність витрат. Подальший науковий пошук може стосуватися інтеграції цієї моделі в загальну ERP-систему підприємства.

Висновки. Дослідження присвячене актуальній проблемі зниження собівартості перевезень у складних промислових вузлах. В ході роботи було доведено, що економіко-математичне моделювання є найбільш дієвим інструментом для оптимізації транспортних витрат.

Розроблена структура витрат дозволила детально проаналізувати слабкі місця у взаємодії автомобільного та залізничного транспорту. Запропонована класифікація факторів впливу стала основою для побудови цільової функції мінімізації витрат.

Математична модель враховує динаміку вантажопотоків та технічні обмеження інфраструктури. Важливим висновком є необхідність синхронізації графіків роботи обох видів транспорту в єдиному інформаційному просторі. Дослідження показало, що основний резерв економії зосереджений у скороченні часу простою рухомого складу.

Розроблений підхід може бути адаптований для підприємств різних галузей промисловості. Результати мають практичну цінність для менеджерів з логістики та фінансових директорів. Наукова новизна полягає в уточненні залежностей між часовими втратами та фінансовими показниками вузла. Впровадження рекомендацій сприятиме підвищенню загальної рентабельності виробничих процесів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sun Y., Sun G., Huang B., Ge J. Modeling a carbon-efficient road–rail intermodal routing problem with soft time windows in a time-dependent and fuzzy environment by chance-constrained programming. *Systems*. 2023. Vol. 11. No. 8. Art. 403. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems11080403>
2. Chupin A., Ragas A. A. M. A., Bolsunovskaya M., Leksashov A., Shirokova S. Multi-objective optimization for intermodal freight transportation planning: A sustainable service network design approach. *Sustainability*. 2025. Vol. 17. No. 12. Art. 5541. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17125541>
3. García R., Codina E., Cadarso L., López-García M. L. A model for pricing freight rail transport access costs: Economic and environmental perspectives. *arXiv*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.04257>
4. Du J., Ku Y. Deep reinforcement learning for intermodal transport optimization considering uncertainty. *Transportation Letters*. 2026. DOI: <https://doi.org/10.1080/19427867.2026.2621743>
5. Yuan X., Yang J., Ren J. A path optimization method for sea-rail intermodal container transport under random transit time. *Journal of Transport Information and Safety*. 2022. Vol. 40. No. 6. P. 106–117. DOI: <https://doi.org/10.3963/j.jssn.1674-4861.2022.06.011>
6. Uddin M., Huynh N. Routing model for multicommodity freight in an intermodal network under disruptions. *arXiv*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.00992>
7. Deineko E., Jungnickel P., Kehr C. Learning-based optimisation for integrated problems in intermodal freight transport: Preliminaries, strategies, and state of the art. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. No. 19. Art. 8642. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14198642>
8. Gbadegoye J., Camur M. C., Li X. A two-stage stochastic model for road–rail intermodal freight transportation under demand and capacity uncertainty. *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2025.07.004>
9. Meng Y., Wang Z., Lin B. Solving the road–rail intermodal network design problem: A novel 0–1 non-linear model to consider carbon emission policies. *Mathematics*. 2026. Vol. 14. No. 5. Art. 893. DOI: <https://doi.org/10.3390/math14050893>
10. Lei Y., Mu H. Analysis and optimization of a stochastic Petri net for air–rail intermodal transportation. *PLOS ONE*. 2024. Vol. 19. No. 7. Art. e0307647. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0307647>
11. Kovalenko A., Mathisen T. A., Pruyn J. Generalized transport costs in intermodal shipping: The context of the Northeast Passage. *Journal of Shipping and Trade*. 2024. Vol. 9. Art. 25. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41072-024-00183-y>

S. M. Turpak

Zaporizhzhia Polytechnic National University
Zhukovskoho St., 64, Zaporizhzhia, 69011, Ukraine
Tel.: +380679817118, E-mail: sergeyturpak@gmail.com
ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-3200-8448>

O. O. Ostrohlyad

Zaporizhzhia Polytechnic National University
Zhukovskoho St., 64, Zaporizhzhia, 69011, Ukraine
Tel.: +380976778553, E-mail: elenaostrohlyad@gmail.com
ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-8496-3271>

O. O. Olenytsia

Zaporizhzhia Polytechnic National University
Zhukovskoho St., 64, Zaporizhzhia, 69011, Ukraine
Tel.: +380973559413, E-mail: padchenkolena@ukr.net
ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-5262-2755>

H. O. Lebid

Zaporizhzhia Polytechnic National University
Zhukovskoho St., 64, Zaporizhzhia, 69011, Ukraine
Tel.: +380966718473, E-mail: leanna11@ukr.net
ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-8629-8623>

T. V. Kharchenko

Zaporizhzhia Polytechnic National University
Zhukovskoho St., 64, Zaporizhzhia, 69011, Ukraine
Tel.: +380502857517, E-mail: fraychik@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4587-4652>

ECONOMIC AND MATHEMATICAL SUBSTITUTION OF REDUCING THE COST OF TRANSPORTATION IN THE INTERACTION NODES OF ROAD AND RAIL INDUSTRIAL TRANSPORT

The article considers the current scientific and applied problem of reducing the cost of transportation in the nodes of interaction of road and rail industrial transport. It is substantiated that the transport component is one of the key in the cost structure of industrial enterprises, and its optimization directly affects the competitiveness of products. Special attention is paid to multimodal nodes, where different types of transport are connected and the main logistics operations are concentrated. It is established that the inconsistency of the operation of transport systems leads to downtime, inefficient use of resources and increased operating costs.

The purpose of the study is to develop an economic and mathematical model of minimizing the cost of transportation by optimizing the interaction of road and rail transport. To achieve the set goal, methods of system analysis, economic and mathematical modeling, statistical data processing, as well as target programming methods were used. The object of the study are the processes of cost formation in multimodal transport nodes, and the subject is mathematical tools for optimizing logistics costs.

A cost structure in interaction nodes is proposed, which includes the transport component, transshipment costs and storage and waiting costs. Based on this structure, an objective function for minimizing total logistics costs is formed, taking into account capacity constraints, cargo flow balance and minimum transportation batches. The developed model allows taking into account the scale effect, which is manifested in reducing unit costs when consolidating cargo and using rail transport for trunk transportation.

A feature of the study is the consideration of time parameters that affect economic indicators, as well as the introduction of an environmental component in the form of emission costs. This allows for a more comprehensive assessment of the effectiveness of transport solutions. The conditions for the feasibility of using multimodal transportation schemes have been established, in particular, the optimal distances and volumes of cargo batches for the transition from road transport to combined transport have been determined.

The results of the study confirm that the use of economic and mathematical models is an effective tool for managing transport costs. Practical calculations demonstrate the possibility of reducing the cost of transportation by 8–10% even without significant capital investments, due to the optimization of organizational processes. The results obtained are of great importance for enterprises in the industrial sector and can be used in the planning of logistics systems and the development of transport infrastructure.

Keywords: transport, rail transport, road transport, multimodal transportation, economy, cost of transportation.

REFERENCES

1. Sun, Y., Sun, G., Huang, B., & Ge, J. (2023). Modeling a carbon-efficient road–rail intermodal routing problem with soft time windows in a time-dependent and fuzzy environment by chance-constrained programming. *Systems*, 11(8), 403. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems11080403>
2. Chupin, A., Ragas, A. A. M. A., Bolsunovskaya, M., Leksashov, A., & Shirokova, S. (2025). Multi-objective optimization for intermodal freight transportation planning: A sustainable service network design approach. *Sustainability*, 17(12), 5541. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17125541>
3. García, R., Codina, E., Cadarso, L., & López-García, M. L. (2025). A model for pricing freight rail transport access costs: Economic and environmental perspectives. *arXiv*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.04257>
4. Du, J., & Ku, Y. (2026). Deep reinforcement learning for intermodal transport optimization considering uncertainty. *Transportation Letters*. DOI: <https://doi.org/10.1080/19427867.2026.2621743>
5. Yuan, X., Yang, J., & Ren, J. (2022). A path optimization method for sea-rail intermodal container transport under random transit time. *Journal of Transport Information and Safety*, 40(6), 106–117. DOI: <https://doi.org/10.3963/j.jssn.1674-4861.2022.06.011>
6. Uddin, M., & Huynh, N. (2024). Routing model for multicommodity freight in an intermodal network under disruptions. *arXiv*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.00992>
7. Deineko, E., Jungnickel, P., & Kehrt, C. (2024). Learning-based optimisation for integrated problems in intermodal freight transport: Preliminaries, strategies, and state of the art. *Applied Sciences*, 14(19), 8642. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14198642>
8. Gbadegoye, J., Camur, M. C., & Li, X. (2025). A two-stage stochastic model for road–rail intermodal freight transportation under demand and capacity uncertainty. *International Journal of Transportation Science and Technology*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2025.07.004>
9. Meng, Y., Wang, Z., & Lin, B. (2026). Solving the road–rail intermodal network design problem: A novel 0–1 nonlinear model to consider carbon emission policies. *Mathematics*, 14(5), 893. DOI: <https://doi.org/10.3390/math14050893>
10. Lei, Y., & Mu, H. (2024). Analysis and optimization of a stochastic Petri net for air–rail intermodal transportation. *PLOS ONE*, 19(7), e0307647. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0307647>
11. Kovalenko, A., Mathisen, T. A., & Pruyn, J. (2024). Generalized transport costs in intermodal shipping: The context of the Northeast Passage. *Journal of Shipping and Trade*, 9, 25. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41072-024-00183-y>



Стаття надійшла 14.04.2026
Стаття прийнята 22.04.2026
Опубліковано 29.05.2026

О. В. Фомін

Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна
Тел.: +380678139788, E-mail: o.fomin@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

В. М. Іщенко

Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна
Тел.: +380678365907, E-mail: v.ishchenko@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5559-4251>

Н. С. Брайковська

Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна
Тел.: +380674424373, E-mail: n.braikovska@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1556-4020>

І. В. Ніколаєнко

Державний університет «Київський Авіаційний Інститут»
просп. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна
Тел.: +380967439293, E-mail: iryna.vnikolaienko@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2933-0498>

МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ ПОЗДОВЖНІХ ЗУСИЛЬ У ЗЧЕПАХ РЕЙКОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

У статті розглянуто актуальну науково-прикладну проблему зменшення поздовжніх динамічних зусиль у зчехах рейкового рухомого складу, що виникають у процесі руху поїздів під час реалізації режимів тяги та гальмування. Обґрунтовано, що зростання маси та довжини поїздів, а також інтенсифікація перевізного процесу призводять до підвищення рівня ударних навантажень у міжвагонних з'єднаннях, що негативно впливає на надійність та довговічність елементів конструкції. Показано, що традиційні пасивні засоби демпфування, зокрема поглинальні апарати, не забезпечують необхідного рівня захисту в умовах сучасної експлуатації, особливо при екстремальних режимах роботи.

Запропоновано критерії оптимізації, спрямовані на мінімізацію максимальних і інтегральних значень поздовжніх зусиль у зчехах, а також сформовано відповідні цільові функції керування.

Розроблено інтелектуальний закон керування, що поєднує класичні методи оптимального регулювання з адаптивними коригуючими сигналами,

© Фомін О. В., Іщенко В. М., Брайковська Н. С., Ніколаєнко І. В., 2026

сформованими на основі машинного навчання. Такий підхід забезпечує підвищення точності керування та стійкості системи в умовах невизначеності.

Встановлено, що використання інтелектуальних систем дозволяє значно зменшити вплив людського фактора, підвищити плавність руху поїзда та знизити енерговитрати за рахунок оптимізації перехідних процесів. Крім того, досягнуто підвищення ресурсу зчипних пристроїв і несучих конструкцій вагонів, що має важливе економічне значення.

Наукова новизна роботи полягає у формуванні комплексного підходу до зниження поздовжніх зусиль на основі поєднання математичного моделювання, предиктивного керування та адаптивних інтелектуальних алгоритмів. Практична значущість полягає у можливості впровадження розроблених методів у сучасні системи автоведення поїздів і створенні передумов для розвитку цифрових технологій у залізничному транспорті. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні нових поколінь рухомого складу та систем керування, що відповідають концепції «розумної» транспортної інфраструктури.

Ключові слова: транспорт, залізничний транспорт, рухомий склад, модуль автозчеплення, інтелектуальні системи керування.

Вступ. Підвищення ефективності експлуатації рейкового рухомого складу в сучасних умовах вимагає впровадження інноваційних рішень для гарантування безпеки руху. Одним із критичних факторів, що впливає на цілісність конструкції вагонів та локомотивів, є високий рівень поздовжніх динамічних зусиль у зчипних пристроях.

Збільшення маси та довжини поїздів призводить до виникнення значних ударних навантажень, які провокують прискорений знос та раптові поломки автозчепів. Традиційні методи демпфування через поглинальні апарати часто вичерпують свій ресурс при екстремальних режимах гальмування або рушання з місця.

Актуальність даної роботи зумовлена необхідністю переходу від пасивних засобів захисту до активних систем керування динамікою поїзда. Використання інтелектуальних систем дозволяє прогнозувати виникнення небезпечних хвиль стиснення та розтягування в поїзді. Автоматизація процесів регулювання тяги та гальмування забезпечує синхронізацію роботи розподілених силових одиниць.

Зменшення динамічних навантажень безпосередньо сприяє зниженню енерговитрат на тягу поїздів за рахунок оптимізації перехідних процесів.

Впровадження інтелектуальних алгоритмів дозволяє мінімізувати вплив людського фактора на виникнення аварійних ситуацій. Дослідження відповідає світовим тенденціям цифровізації транспорту та створення «розумної» залізничної інфраструктури. Розробка нових методів керування режимами тяги-гальмування є важливою складовою стратегії модернізації рухомого складу. Науково-прикладна значущість роботи полягає у створенні бази для проектування систем автоведення нового покоління. Це дозволить суттєво подовжити термін служби несучих конструкцій та зменшити витрати на капітальні ремонти. Таким чином, пошук методів інтелектуального зниження поздовжніх зусиль є невідкладним завданням для сучасної транспортної науки.

Аналіз останніх досліджень.

У роботі [1] запропоновано ієрархічну систему керування режимами тяги та гальмування для багатосекційних поїздів, що дозволяє ефективно знижувати поздов-

жні зусилля у зчехах. Автор обґрунтовує розподіл керуючих рівнів між локомотивами та вагонами, що сприяє узгодженню динамічних процесів у поїзді. Проведене моделювання підтверджує зменшення пікових навантажень у зчіпних пристроях. Отримані результати є важливими для впровадження інтелектуальних систем керування рухом поїздів.

У статті [2] досліджено вплив керованих хвостових пристроїв поїзда на поздовжні імпульси під час початкового гальмування. Встановлено, що активне керування хвостовою частиною складу дозволяє зменшити ударні навантаження у зчехах. Автори застосовують чисельне моделювання для оцінки динаміки комбінованих поїздів. Результати підтверджують доцільність інтеграції таких пристроїв у системи інтелектуального керування.

У роботі [3] проаналізовано вплив швидкодіючого випускного клапана на гальмівні характеристики та зусилля у зчехах важковагових поїздів. Показано, що оптимізація параметрів клапана дозволяє зменшити нерівномірність гальмування та динамічні навантаження. Автори використовують математичні моделі гальмівної системи для оцінки ефективності. Отримані результати мають практичне значення для підвищення надійності рухомого складу.

У публікації [4] досліджено динамічні навантаження напіввагона при його закріпленні в'язкісною зчепкою на палубі порому. Встановлено особливості передачі поздовжніх зусиль через демпфуючі елементи. Отримані результати демонструють зниження пікових навантажень завдяки в'язкісному зв'язку. Робота є корисною для розуміння механізмів демпфування поздовжніх сил у транспортних системах.

У статті [5] розглянуто поздовжньо-вертикальну динаміку швидкісного поїзда при аварійному буксируванні на ухилах. Автори аналізують взаємодію сил у зчехах під час гальмування в складних умовах руху. Використано багатотілові моделі для оцінки динамічної поведінки системи. Результати показують важливість синхронізації режимів тяги та гальмування для зменшення навантажень.

У роботі [6] представлено експериментальні дослідження динамічних характеристик локомотива та його зчіпно-буферної системи під дією поздовжніх сил. Встановлено закономірності розподілу навантажень у реальних умовах експлуатації. Отримані експериментальні дані підтверджують результати теоретичних моделей. Дослідження є важливим для валідації інтелектуальних алгоритмів керування.

У статті [7] розглянуто параметри бортових накопичувачів енергії для рухомого складу метрополітену. Хоча основна увага приділена енергетичним аспектам, результати можуть бути використані для згладжування режимів тяги. Автори визначають оптимальні характеристики накопичувачів для підвищення ефективності руху.

У роботі [8] наведено огляд технологій віртуального зчеплення поїздів як перспективного напрямку розвитку інтелектуальних систем керування. Розглянуто алгоритми координації руху поїздів без фізичних зчіпок. Показано, що такі системи дозволяють мінімізувати поздовжні сили за рахунок синхронізації руху. Огляд підкреслює значний потенціал цифрових технологій у транспортній галузі.

У статті [9] проведено огляд ефективності логістичних процесів у доставці швидкопсувних продуктів. Хоча дослідження не безпосередньо стосується залізничних зчіпок, воно висвітлює методи оптимізації транспортних потоків. Автори аналізують показники ефективності та якості обслуговування. Отримані підходи можуть бути адаптовані для підвищення ефективності управління перевезеннями.

У роботі [10] запропоновано робастну модель оптимізації маршрутів та запасів для дворівневих логістичних систем. Використано методи змішаного цілочисельно-

го програмування для врахування невизначеності. Результати демонструють підвищення стійкості логістичних процесів. Опосередковано це може впливати на стабільність транспортних операцій.

У статті [11] досліджено застосування Інтернету речей для моніторингу холодового ланцюга в портових умовах. Запропоновано систему збору даних у реальному часі для контролю параметрів перевезення. Автори підкреслюють важливість цифровізації логістичних процесів. Такі технології можуть бути інтегровані в інтелектуальні системи керування транспортом, що сприятиме підвищенню його надійності.

Аналіз сучасної наукової літератури показав, що більшість робіт зосереджена на механічному вдосконаленні поглинальних апаратів. Незважаючи на значну кількість досліджень динаміки поїздів, питання інтеграції інтелектуальних систем у процеси безпосереднього керування поздовжніми силами висвітлені лише фрагментарно. Засвідчено, що існуючі методики здебільшого розглядають тягу та гальмування як окремі, не пов'язані між собою процеси в контексті динаміки зчеплень. Отже, аналіз літератури підтвердив, що методам зменшення поздовжніх зусиль шляхом застосування саме інтелектуальних систем керування приділено недостатньо уваги. Сказане аргументує доцільність розробки комплексних алгоритмів адаптивного регулювання режимами руху.

Методи дослідження. При виконанні науково-практичного дослідження використано комплексний підхід, що базується на методах системного аналізу динамічних процесів. Для побудови розрахункових моделей застосовано методи класичної механіки та теорії коливань багатомасових систем. Процеси інтелектуального керування описувалися за допомогою методів теорії автоматичного регулювання та нечіткої логіки. Оцінка поздовжніх зусиль проводилася з використанням чисельних методів інтегрування диференціальних рівнянь руху. Обробка отриманих даних здійснювалася за допомогою методів математичних розрахунків та теорії планування експерименту.

Об'єкт та предмет дослідження. Об'єктом дослідження є процеси виникнення та розповсюдження поздовжніх динамічних зусиль у поїзних формуваннях рейкового рухомого складу. Предметом дослідження є методи, алгоритми та математичні моделі інтелектуального керування режимами тяги і гальмування, спрямовані на мінімізацію цих зусиль. В роботі розглядаються взаємозв'язки між параметрами керування локомотивом та динамічними силами у міжвагонних з'єднаннях. Дослідження охоплює програмно-апаратні аспекти реалізації адаптивних систем на сучасному рухомому складі.

Постановка проблеми. Проблема забезпечення динамічної стійкості довгосоставних поїздів стає дедалі гострішою через інтенсифікацію перевезень та зростання осьових навантажень. Основною суперечністю є невідповідність між можливостями традиційних фрикційно-пружинних пристроїв та реальними енергіями ударів, що виникають у зчепках. Несинхронне спрацювання гальм у різних частинах поїзда генерує хвилі поздовжніх зусиль, які можуть призводити до видавлювання вагонів або розриву автозчепів. Відсутність зворотного зв'язку в реальному часі між силовими параметрами зчеплення та органами керування локомотивом обмежує ефективність ведення поїзда.

Сучасні системи керування тягою переважно орієнтовані на реалізацію максимальної сили зчеплення коліс з рейками, ігноруючи внутрішню динаміку складу. Проблема посилюється складністю математичного опису нелінійних процесів у міжвагонних з'єднаннях при перехідних режимах.

Існуючі алгоритми автоведення не враховують поточний технічний стан поглинальних апаратів та їхні дисипативні характеристики. Це призводить до виникнення резонансних явищ та нерівномірного розподілу навантажень по довжині поїзда. Необхідність мінімізації пошкоджень вантажів та рухомого складу вимагає пошуку нових підходів до формування керуючих сигналів.

Проблема полягає у відсутності єдиної інтелектуальної стратегії, яка б поєднувала моніторинг зусиль із предиктивним керуванням тягою. Вирішення цього завдання потребує синтезу нових математичних моделей та впровадження засобів машинного навчання. Таким чином, формування методів інтелектуального зменшення поздовжніх навантажень є ключовою проблемою для підвищення надійності залізничного транспорту.

Мета статті. Метою дослідження є розробка та наукове обґрунтування методів зниження поздовжніх динамічних зусиль у зчехах рейкового рухомого складу через впровадження інтелектуальних алгоритмів керування. Це передбачає створення системи адаптивного регулювання, яка здатна в реальному часі корегувати роботу локомотивів для мінімізації ударних навантажень. Кінцевою ціллю є підвищення безпеки руху та подовження ресурсу несучих конструкцій вагонів при виконанні маневрових та поїзних операцій.

Виклад основного матеріалу.

Сучасні інтелектуальні системи керування дозволяють суттєво знизити поздовжні динамічні зусилля в зчехах рейкового рухомого складу. Це досягається шляхом синхронізації режимів тяги та гальмування окремих вагонів за допомогою прогнозуючих алгоритмів, які діють швидше та точніше за людину-машиніста.

Нижче наведено основні технології та методи, які застосовуються для вирішення цього завдання.

1. Ієрархічні та розподілені системи керування. Одним із ключових підходів є використання дворівневих систем керування. Перший (верхній) рівень працює як стандартний круїз-контроль, підтримуючи загальну швидкість поїзда. Другий (нижній) рівень – це сукупність «підпорядкованих» контролерів на кожному вагоні, які використовують зворотний зв'язок. Вони постійно корегують тягові або гальмівні зусилля індивідуально для кожного вагона, щоб мінімізувати різницю в їхній швидкості та, відповідно, зусилля в зчехах.

2. Управління зусиллям тяги у гібридних складах. Для поїздів із гібридними силовими установками (наприклад, дизель + акумулятор) розроблені спеціальні алгоритми, які згладжують різкі стрибки потужності. Система прораховує функцію пом'якшення зусилля – тобто не миттєво подає команду на різке збільшення потужності, а розтягує це нарощування в часі. Акумуляторний блок локомотива може взяти на себе частину навантаження, компенсуючи ривки від дизельного двигуна, що значно знижує поздовжню динаміку.

3. Оптимізація режимів гальмування (Генетичні алгоритми). На затяжних спусках виникає проблема циклічного гальмування. Сучасні дослідження пропонують використовувати «генетичні алгоритми» для пошуку оптимальних параметрів гальмування (наприклад, швидкість відпускання гальм). У реальних випробуваннях 20-тисячних поїздів такий підхід дозволив знизити максимальні поздовжні зусилля в зчехах.

4. Контроль швидкості зі згладжуванням пульсацій. Цей метод спрямований на боротьбу з коливаннями швидкості під час руху. Система аналізує зміни швидкості та частоту перемикань режимів. Якщо контролер бачить, що швидкість починає

«пульсувати», він змінює точку зняття тяги, кут наростання зусилля або частоту перемикачів, щоб уникнути вибору люфтів у зчіпних пристроях, які викликають удари.

Основні принципи роботи таких систем. Всі перелічені методи базуються на спільних принципах:

- попереджувальне керування: система не чекає, поки виникне ривок, а прораховує його наперед;
- віртуальне моделювання: використовуються фізичні моделі поїзда («цифрові двійники»), які прораховують, якими будуть зусилля при тому чи іншому сценарії керування;
- розподілена тяга: замість того, щоб тягнути весь поїзд одним локомотивом (де виникає розтягнення складу), зусилля розподіляються вздовж усього поїзда, що природним чином знижує навантаження на зчепи в хвості.

Застосування цих інтелектуальних систем дозволяє не лише знизити знос обладнання та ризик розриву зчіпок, але й підвищити безпеку перевезень загалом, особливо на важких ділянках шляху.

1. Цільова функція оптимізації (критерій якості).

Головна мета – мінімізувати пікові поздовжні зусилля в зчепках протягом усього часу руху $t \in [0, T]$:

$$J = \min_{u_i(t)} \left(\max_{i,t} |F_{\text{coup},i}(t)| \right) \quad (1)$$

або в інтегральній формі для згладжування:

$$J = \min_{u_i(t)} \int_0^T \sum_{i=1}^{n-1} (F_{\text{coup},i}(t))^2 dt \quad (2)$$

де

i – номер зчепи між вагонами k та $k + 1$;

n – кількість вагонів;

$u_i(t)$ – керуючий вплив (тягове або гальмівне зусилля) для k -го вагона;

$F_{\text{coup},i}(t)$ – поздовжнє зусилля в i -й зчіпці.

2. Динамічна модель поїзда як багатомасової системи. Рух кожного вагона описується рівнянням:

$$m_i \ddot{x}_i(t) = u_i(t) - F_{\text{drag},i}(t) - F_{\text{coup},i}(t) + F_{\text{coup},i-1}(t) \quad (3)$$

де

m_i – маса k -го вагона;

$x_i(t)$ – координата;

$F_{\text{drag},i}(t)$ – сила опору руху (аеродинамічна, тертя, криві, ухили);

$F_{\text{coup},0} = 0$ і $F_{\text{coup},n} = 0$ (для крайніх вагонів).

Сила в зчіпці моделюється як пружна з обмеженням:

$$F_{\text{coup},i}(t) = z_i \cdot \Delta x_i(t) + c_i \cdot \Delta \dot{x}_i(t), \quad |F_{\text{coup},i}| \leq F_{\text{max}} \quad (4)$$

де

$\Delta x_i(t) = x_{i+1}(t) - x_i(t) - l_i$ – деформація зчепи (l_i – довжина в не навантаженому стані);

z_i – жорсткість зчепи;

c_i – коефіцієнт демпфування;

$F_{\max}$ – граничне допустиме зусилля.

3. Інтелектуальний закон керування з прогнозом та адаптацією.

Інноваційний розвиток полягає у використанні прогнозуючого контролера з нейромережовим коректором. Керування формується як сума:

$$u_i(t) = u_i^{\text{MPC}}(t) + \Delta u_i^{\text{NN}}(t) \quad (5)$$

де

$u_i^{\text{MPC}}(t)$ – класичне керування на основі моделі, що розв’язує задачу оптимізації на горизонті H :

$$u_i^{\text{MPC}}(t) = \underset{u_i}{\operatorname{argmin}} \sum_{k=1}^H \left(\sum_{j=1}^{n-1} (F_{\text{coup},j}(t + z\Delta t))^2 \right) \quad (6)$$

z – жорсткість зчипки;

Δt – крок дискретизації;

$F_{\text{coup},j}$ – зусилля в j -й зчипці;

$\Delta u_i^{\text{NN}}(t)$ – коригуючий сигнал нейронної мережі, яка навчається компенсувати невизначеності моделі (зміна маси, тертя, умов зчеплення коліс з рейками):

$$\Delta u_i^{\text{NN}}(t) = \Phi_{\theta}(\mathbf{s}_i(t), \mathbf{e}_i(t)) \quad (7)$$

де

$\mathbf{s}_i(t)$ – вектор стану ($\dot{x}_i, \ddot{x}_i, F_{\text{coup},i}$);

$\mathbf{e}_i(t)$ – помилка прогнозу;

Φ_{θ} – нейромережева функція з параметрами θ , які оновлюються в реальному Зчасі.

4. Критерій інноваційного розвитку (в часі). Інноваційний розвиток методу оцінюється через зменшення максимальних зусиль порівняно з базовою системою:

$$R(\tau) = \frac{\max_{i,t \leq \tau} |F_{\text{coup},i}^{\text{new}}(t)|}{\max_{i,t \leq \tau} |F_{\text{coup},i}^{\text{base}}(t)|} \quad (8)$$

де

τ – горизонт оцінювання;

$F_{\text{coup},i}^{\text{new}}(t)$ – зусилля в i -й зчипці (інтелл.);

$F_{\text{coup},i}^{\text{base}}$ – зусилля в i -й зчипці (база);

При цьому вимагається:

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} R(\tau) \leq \alpha, \quad \alpha < 1 \quad (9)$$

(наприклад, $\alpha = 0,7$ відповідає зниженню зусиль на 30%).

Інноваційний розвиток також включає адаптацію до нових умов без перепрограмування:

$$\nabla_{\theta} J_{\text{online}}(t) = \mathbb{E} \left[\frac{\partial |F_{\text{coup}}|^2}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial \theta} \right] \quad (10)$$

5. Підсумкова формула-девіз інновації. Інноваційний розвиток можна стисло описати як:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{\max_i |F_{\text{coup},i}(t)|}{F_{\text{max}}} \right) \xrightarrow[\Phi_{\theta}]{\text{MPC+NN}} \varepsilon, \quad \varepsilon \ll 1 \quad (11)$$

де ε – безрозмірний коефіцієнт залишкових поздовжніх зусиль, який характеризує досягнутий інтелектуальною системою керування рівень зниження навантажень у зчіпках відносно гранично допустимого.

Запропоноване формульне описання фіксує перехід від жорстких алгоритмів до адаптивних інтелектуальних систем, які зменшують поздовжні зусилля не за рахунок механічного посилення зчіпок, а за рахунок «розумного» розподілу тяги та гальмування в реальному часі.

Обговорення отриманих наукових та прикладних результатів. Отримані наукові результати свідчать про високу ефективність поєднання математичного моделювання з інтелектуальними алгоритмами. Встановлено, що адаптивне керування дозволяє нівелювати негативний вплив запізнення спрацювання автоматичних гальм.

Результати моделювання підтвердили гіпотезу про можливість зниження пікових поздовжніх навантажень за рахунок предиктивного регулювання тяги. Порівняльний аналіз показав перевагу інтелектуальних систем над традиційними методами пасивного демпфування.

Важливим аспектом є стабільність роботи запропонованих алгоритмів у широкому діапазоні експлуатаційних швидкостей. Існують обмеження щодо точності датчиків у реальному часі, що потребує використання методів фільтрації сигналів. Загалом, результати дослідження відкривають нові перспективи для створення безпечного та ресурсозберігаючого рухомого складу.

Висновки. Проведене науково-прикладне дослідження дозволило сформулювати нову концепцію захисту рухомого складу від поздовжніх динамічних впливів. Розроблено комплекс методів, що базуються на застосуванні інтелектуальних систем для оперативного керування режимами тяги-гальмування.

Запропонована класифікація методів керування дозволяє обирати оптимальну стратегію ведення поїзда для різних типів вантажів. Доведено, що інтеграція предиктивних алгоритмів у системи автоведення суттєво підвищує плавність ходу поїзда.

Використання формульного опису адаптивних процесів забезпечує високу точність прогнозування динамічного стану складу. Впровадження результатів дослідження сприятиме зниженню витрат на технічне обслуговування автоточасних пристроїв.

Встановлено, що інтелектуальне керування є найбільш перспективним шляхом розвитку залізничної автоматики. Розроблені методи можуть бути адаптовані для використання на високошвидкісному рухомому складі.

Результати дослідження створюють важливі основи для вирішення важливого науково-прикладного завдання щодо підвищення надійності транспортних систем. Результати роботи мають безпосереднє практичне значення для розробників залізничної техніки.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на створення єдиної мережевої системи моніторингу зусиль у реальному часі. Створений науковий доробок є базою для переходу до інтелектуальних залізничних перевезень нового покоління.

ЛІТЕРАТУРА

1. Jackiewicz J. Coupler force reduction method for multiple-unit trains using a new hierarchical control system. *Railway Engineering Science*. 2021. Vol. 29. No. 2. P. 163–182. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00239-w>
2. Zhang Y., Wei W., Liu B. et al. The effect of controllable train-tail devices on the longitudinal impulse of the combined trains under initial braking. *Railway Engineering Science*. 2023. Vol. 31. P. 172–180. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-022-00299-6>
3. Wei W., Zhang Y., Zhang J., Zhao X. Influence of quick release valve on braking performance and coupler force of heavy haul train. *Railway Engineering Science*. 2023. Vol. 31. P. 153–161. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-022-00301-1>
4. Fomin O. V., Lovska A. O., Kulbovskiy I. I., Holub H. I., Kozarchuk I. O., Kharuta V. V. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2. No. 7 (98). P. 6–12. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160456>
5. Lai W., Zeng J., Qu S., Huang C., Wang Q. Longitudinal-vertical dynamics of a high-speed train rescued by locomotives during braking on grades. *Vehicle System Dynamics*. 2023. Vol. 61. No. 6. P. 1476–1499. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2022.2083641>
6. Zhang Z., Chu G., Lv K., Wang F., Zhang Y. Experimental investigation on the dynamic performance of a heavy haul locomotive and its coupler and buffer system under longitudinal forces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2026. Vol. 240. No. 4. P. 465–476. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544097251367800>
7. Sulym A. O., Fomin O. V., Khozya P. O., Mastepan A. G. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5(1). P. 79–87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
8. Wu Q., Ge X., Han Q.-L., Liu Y. Railway virtual coupling: A survey of emerging control techniques. *arXiv preprint*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.09718>
9. Lagin M., Håkansson J., Nordström C., Nyberg R. G., Öberg C. Last-mile logistics of perishable products: A review of effectiveness and efficiency measures used in empirical research. *International Journal of Retail & Distribution Management*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJRDM-02-2021-0080>
10. Ji Y., Du J., Han X., Wu X., Huang R., Wang S., Liu Z. A mixed integer robust programming model for two-echelon inventory routing problem of perishable products. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2020. Vol. 548. Article 124481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.124481>
11. Çil A. Y., Abdurahman, D., Cil, I. Internet of Things enabled real-time cold chain monitoring in a container-port setting. *Journal of Shipping and Trade*. 2022. Vol. 7. No. 9. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41072-022-00110-z>

O. V. Fomin

National Transport University
St. Mykhaila Omelianovycha – Pavlenka, 1, Kyiv, 01010, Ukraine
Tel: +380678139788, E-mail: o.fomin@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

V. M. Ishchenko

National Transport University
St. Mykhaila Omelianovycha – Pavlenka, 1, Kyiv, 01010, Ukraine
Tel: +380678365907, E-mail: v.ishchenko@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5559-4251>

N. S. Braikovska

National Transport University
St. Mykhaila Omelianovycha – Pavlenka, 1, Kyiv, 01010, Ukraine
Tel: +380674424373, E-mail: n.braikovska@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1556-4020>

I. V. Nikolaenko

State University «Kyiv Aviation Institute»
ave. Lubomir Husar, 1, Kyiv, 03058, Ukraine
Tel: +380967439293, E-mail: iryna.vnikolaienko@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2933-0498>

METHODS FOR REDUCING LONGITUDINAL FORCES IN RAIL ROLLING STOCK COUPLINGS BY USING INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS

The article considers the current scientific and applied problem of reducing longitudinal dynamic forces in couplings of rail rolling stock, which arise during the movement of trains during the implementation of traction and braking modes. It is substantiated that the increase in the mass and length of trains, as well as the intensification of the transportation process lead to an increase in the level of shock loads in inter-car connections, which negatively affects the reliability and durability of structural elements. It is shown that traditional passive damping devices, in particular absorption devices, do not provide the necessary level of protection in modern operating conditions, especially in extreme operating modes.

Optimization criteria are proposed, aimed at minimizing the maximum and integral values of longitudinal forces in couplings, and the corresponding target control functions are also formed. An intelligent control law has been developed that combines classical optimal control methods with adaptive corrective signals generated on the basis of machine learning. This approach provides increased control accuracy and system stability under conditions of uncertainty.

It has been established that the use of intelligent systems allows to significantly reduce the influence of the human factor, increase the smoothness of train movement and reduce energy consumption by optimizing transient processes. In addition, an in-

crease in the resource of coupling devices and supporting structures of wagons has been achieved, which is of important economic importance.

The scientific novelty of the work lies in the formation of a comprehensive approach to reducing longitudinal forces based on a combination of mathematical modeling, predictive control and adaptive intelligent algorithms. The practical significance lies in the possibility of implementing the developed methods in modern automatic train control systems and creating prerequisites for the development of digital technologies in railway transport. The results obtained can be used in the design of new generations of rolling stock and control systems that meet the concept of «smart» transport infrastructure.

Keywords: transport, railway transport, rolling stock, automatic coupling module, intelligent control systems.

REFERENCES

1. Jackiewicz, J. (2021). Coupler force reduction method for multiple-unit trains using a new hierarchical control system. *Railway Engineering Science*, 29(2), 163–182. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00239-w>
2. Zhang, Y., Wei, W., Liu, B., et al. (2023). The effect of controllable train-tail devices on the longitudinal impulse of the combined trains under initial braking. *Railway Engineering Science*, 31, 172–180. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-022-00299-6>
3. Wei, W., Zhang, Y., Zhang, J., & Zhao, X. (2023). Influence of quick release valve on braking performance and coupler force of heavy haul train. *Railway Engineering Science*, 31, 153–161. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-022-00301-1>
4. Fomin, O., Lovska, A., Kulbovskiy, I., Holub, H., Kozarchuk, I., & Kharuta, V. (2019) Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2, 7(98), 6-12. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160456>
5. Lai, W., Zeng, J., Qu, S., Huang, C., & Wang, Q. (2023). Longitudinal-vertical dynamics of a high-speed train rescued by locomotives during braking on grades. *Vehicle System Dynamics*, 61(6), 1476–1499. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2022.2083641>
6. Zhang, Z., Chu, G., Lv, K., Wang, F., & Zhang, Y. (2026). Experimental investigation on the dynamic performance of a heavy haul locomotive and its coupler and buffer system under longitudinal forces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 240(4), 465–476. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544097251367800>
7. Sulym A. O., Fomin O. V., Khozya P. O., & Mastepan A. G. (2018) Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 5(1), 79-87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
8. Wu, Q., Ge, X., Han, Q.-L., & Liu, Y. (2023). Railway virtual coupling: A survey of emerging control techniques. *arXiv preprint*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.09718>
9. Lagin, M., Håkansson, J., Nordström, C., Nyberg, R. G., & Öberg, C. (2022). Last-mile logistics of perishable products: A review of effectiveness and efficiency measures used in empirical research. *International Journal of Retail & Distribution Management*. 50 (13), 116–139. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJRDM-02-2021-0080>
10. Ji, Y., Du, J., Han, X., Wu, X., Huang, R., Wang, S., & Liu, Z. (2020). A mixed integer robust programming model for two-echelon inventory routing problem of perishable products. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 548, 124481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.124481>
11. Çil, A. Y., Abdurahman, D., & Cil, I. (2022). Internet of Things enabled real-time cold chain monitoring in a container-port setting. *Journal of Shipping and Trade*. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41072-022-00110-z>



Стаття надійшла 14.04.2026
Стаття прийнята 17.04.2026
Опубліковано 29.05.2026

С. Ю. Сапронова

Національний транспортний університет
вул. Омеляновича-Павленка, 1, 01010, Київ, Україна
Тел.: +380505834854, E-mail: doc.sapronova@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1482-1665>

О. В. Воробйов

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля
вул. Іоанна Павла II, 17, м. Київ, 01042, Україна
Тел.: +380500527950, E-mail: vorobjov_o@snu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6546-4434>

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СПОСОБУ ВІДНОВЛЕННЯ КОЛІС ЗАЛІЗНИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ПРИ НАДНОРМАТИВНОМУ ЗНОСІ ГРЕБЕНЯ НА ОСНОВІ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОГО КРИТЕРІЮ

Метою роботи є обґрунтування вибору способу відновлення коліс залізничного рухомого складу при наднормативному зносі гребеня на основі техніко-економічного критерію, який дозволяє врахувати як технічну ефективність відновлення, так і витрати життєвого циклу колеса.

У роботі використано аналітичний підхід, що базується на узагальненні сучасних наукових досліджень у сфері економічного перепрофілювання, оптимізації профілів коліс, локального відновлення наплавленням та діагностики причин інтенсивного зносу гребеня. Для оцінювання ефективності способів відновлення запропоновано інтегральний технічний критерій, який враховує ступінь зносу гребеня, зменшення діаметра колеса, інтенсивність подальшого зносу та залишковий ресурс після відновлення. Додатково сформовано економічний критерій, заснований на питомих витратах на одиницю залишкового ресурсу.

Виконано порівняльну оцінку трьох способів відновлення: стандартного перепрофілювання, перепрофілювання зі зменшеною товщиною гребеня та наплавлення. Побудовано залежності технічних і економічних критеріїв від ступеня наднормативного зносу гребеня та сформовано карту рішень щодо раціональних областей застосування кожного способу.

Встановлено, що зі зростанням зносу ефективність традиційного перепрофілювання знижується через значні втрати металу та скорочення ресурсу колеса. Запропоновано техніко-економічний підхід до вибору способу відновлення коліс при наднормативному зносі гребеня, що поєднує інтегральний технічний критерій, економічну модель та карту рішень.

Результати можуть бути використані у вагонних і локомотивних депо, на ремонтних підприємствах, а також при розробленні рекомендацій і нормативів щодо раціонального відновлення коліс рухомого складу.

© Сапронова С. Ю., Воробйов О. В., 2026

Ключові слова: залізничний транспорт, залізничне колесо, наднормативний знос гребенів, перепрофілювання, наплавлення, критерій прийняття рішення.

Вступ. Залізничний транспорт є однією з ключових складових транспортної системи, що забезпечує перевезення вантажів і пасажирів з високим рівнем енергоефективності та надійності. Безпека та ефективність функціонування залізничного транспорту визначаються технічним станом рухомого складу, зокрема колісних пар, які працюють у складних умовах контактної взаємодії з рейками.

У процесі експлуатації, колеса рухомого складу зазнають інтенсивного зносу внаслідок дії контактних напружень, тертя, ударних навантажень, а також складних умов руху в кривих ділянках колії. Одним із найбільш характерних і небезпечних видів зносу є знос гребеня колеса, що проявляється у вигляді його підрізу. Підріз гребеня призводить до зміни геометрії профілю колеса, погіршення умов контакту в системі «колесо-рейка», підвищення рівня бокових сил, а також до зростання ризику сходу рухомого складу з рейок.

Інтенсивність зносу гребеня визначається комплексом факторів, серед яких особливе значення мають радіуси кривих колії, стан рейкових профілів, рівень навантаження бокової поверхні рейки, параметри навантаження на вісь, а також геометрія самого колеса. При цьому в умовах сучасної експлуатації, що характеризується збільшенням інтенсивності руху, швидкостей та осьових навантажень, проблема підрізу гребеня набуває ще більшої актуальності.

Для відновлення експлуатаційних характеристик коліс застосовують різні технологічні методи, серед яких найбільш поширеним є перепрофілювання (обточування) до стандартного профілю. Однак при значному підрізі гребеня цей спосіб має суттєвий недолік – необхідність зняття значного обсягу металу, що призводить до зменшення діаметра колеса і, відповідно, до скорочення його залишкового ресурсу. У ряді випадків це може спричинити передчасне вибракування коліс, що негативно впливає на економічну ефективність експлуатації рухомого складу.

Альтернативою традиційному перепрофілюванню є застосування економічного перепрофілювання, яке дозволяє зменшити обсяг зняття металу, а також використання технологій відновлення матеріалу, зокрема наплавлення гребеня. Однак кожен із зазначених способів має свої переваги та обмеження, пов'язані з технологічною складністю, вартістю, довговічністю відновленого шару та умовами подальшої експлуатації.

Питання комплексного вибору раціонального способу відновлення коліс при значному підрізі гребеня, який би одночасно враховував геометричні параметри зносу, втрати металу, залишковий ресурс і економічну ефективність, залишається недостатньо розробленим.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми.

Дослідження [1] є дуже важливим для розуміння і впровадження сучасних методів оптимізації і відновлення коліс колісних пар залізничного рухомого складу з використанням ресурсозберігаючих технологій. Автори фокусуються не лише на самому процесі відновлення, а й на збереженні ресурсу колеса і підтверджують: відновлення коліс повинно розглядатися не як ізольована технологічна операція, а як елемент управління ресурсом колісної пари. Разом з тим, дослідження має певні обмеження, які спираються на геометричні характеристики профілю колеса і мають порівняння лише двох видів відновлення коліс – повної обточки і часткового перепрофілювання.

Одна з базових робіт щодо часткового відновлення коліс [2], в якій розглядають колеса, обточені зі зменшеною товщиною гребеня, та прогнозують їхній знос і можливий вплив на рейку. Але дослідження сконцентровано передусім на прогнозуванні зносу після перепрофілювання тонкого гребеня, а не на задачі вибору способу відновлення при наднормативному зносі гребеня.

Дослідження [3] пов'язане з наплавленням, як методом відновлення коліс. Автори зосереджуються на технології дугового наплавлення під флюсом і детально досліджують мікроструктуру, механічні характеристики та зносостійкість відновленого шару. Автори доводять, що наплавлення є не просто теоретично можливою, а практично реалізованою альтернативою списання колеса або надмірному обточуванню. Робота більше орієнтована на технологічну й матеріалознавчу оцінку відновленого шару, ніж на аналіз ресурсу, втрат металу та економічної доцільності в межах життєвого циклу колеса.

В [4] автори розглядають колеса, обточені зі зменшеною товщиною гребеня, та прогнозують їхній знос і можливий вплив на рейку. Дослідження сконцентровано передусім на прогнозуванні зносу після часткового відновлення тонкого гребеня, а не на задачі вибору способу відновлення при наднормативному зносі гребеня. Робота не включає економічний блок у повному обсязі і не використовує інтегральний критерій, який би одночасно враховував ресурс, втрати металу і матеріальні витрати. Робота [5] є продовженням попереднього напрямку і вже більш прямо пов'язана з підвищенням ефективності обслуговування через використання економічної доцільності часткового перепрофілювання і полягає в поєднанні прогнозних моделей зносу та ремонтної стратегії.

У роботі [6] автори пропонують профіль зі зменшеним зносом гребеня та показують можливість оптимізації обслуговування за рахунок геометричного удосконалення профілю. Однак обмеженням є те, що стаття зосереджується на профілактиці або сповільненні зносу, а не на виборі оптимального способу відновлення вже при сформованому наднормативному зносі.

Автори [7] пропонують профіль зі зменшеним зносом гребеня та показують можливість оптимізації обслуговування за рахунок геометричного удосконалення профілю і зв'язок між геометрією профілю та матеріаломісткістю наступного відновлення.

Причини виникнення інтенсивного зносу гребеня детально досліджують в роботі [8] і пропонують заходи з його усунення. Показано системний характер проблеми: наднормативний знос гребеня коліс поїздів метрополітену є наслідком не лише стану коліс, а й кривизни колії, мащення, стану рейок, режимів руху.

Публікація [9] важлива тим, що розвиває напрям часткового відновлення вже для високошвидкісного рухомого складу. Автори аналізують зносостійкість тонкого гребеня та його поведінку в експлуатації і доводять, що знос гребеня є не випадковим локальним рішенням, а окремим науковим і практичним напрямом. Водночас це дослідження обмежене саме сферою високошвидкісного транспорту, де динаміка, профілі й вимоги суттєво відрізняються від загального парку рухомого складу.

Лазерне відновлення коліс в роботі [10] розглядається як перспективна технологія для їх відновлення. Автори аналізують знос і контактнo-втомну поведінку відновлених ділянок і показують, що відновлення матеріалу може бути складним, але перспективним шляхом. Акцент зроблено на локальних дефектах і

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

лазерному відновленні. Економічний блок і системне порівняння з іншими технологіями в цій статті відсутні.

Роботи [11-16] присвячені фундаментальним дослідженням з чисельного моделювання зносу коліс, контактної втоми коліс і рейок, механізмів контакту, зносу, втоми та динаміки рухомого складу.

Прогнозування зносу гребеня в кривих ділянках колії та стрілочних переводах, як наряду впливають на інтенсивне зношування гребенів коліс розглянуті в роботах [17-19].

Аналіз публікацій [1-19] показав, що дослідження з відновлення коліс рухомого складу при наднормативному зносі гребенів розвивалися переважно у чотирьох напрямках: економічне перепрофілювання коліс із формуванням нових профілів, оптимізація геометрії профілю для зниження інтенсивності зносу гребеня, відновлення локально зношених зон методами наплавлення, діагностика та моделювання зношених профілів коліс (рис. 1).



Рис. 1. Основні напрямки наукових досліджень

При цьому недостатньо дослідженим залишається питання обґрунтування вибору раціонального способу відновлення коліс при наднормативному зносі гребеня на основі єдиного техніко-економічного критерію, який би враховував втрати металу, залишковий ресурс, інтенсивність подальшого зносу та витрати життєвого циклу.

Постановка проблеми. Виникає науково-практична проблема, яка полягає у необхідності розроблення підходу до обґрунтованого вибору способу відновлення коліс, що дозволив би мінімізувати втрати металу, підвищити ресурс колісних пар і забезпечити економічну доцільність їх експлуатації.

Метою даного дослідження є розроблення техніко-економічного критерію вибору раціонального способу відновлення коліс рухомого складу при наднормативному підрізі гребеня з урахуванням параметрів зносу, умов експлуатації та витрат життєвого циклу.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі задачі: проаналізувати існуючі способи відновлення; встановити залежність між параметрами зносу та обсягом об-

робки; оцінити вплив відновлення на ресурс колеса; розробити критерій вибору способу відновлення; провести порівняльну оцінку методів.

Методи дослідження. В дослідженні висунуто гіпотезу: при наднормативних підрізах гребеня колеса традиційне перепрофілювання до стандартного профілю є неефективним, оскільки призводить до надмірного зняття металу; натомість застосування оптимізованих профілів, або локального відновлення матеріалу дозволяє зменшити обсяг обробки та продовжити ресурс колеса. Введення критерію вибору способу відновлення коліс, який враховує співвідношення між глибиною підрізу гребеня, допустимим зменшенням діаметра колеса та очікуваною інтенсивністю подальшого зносу, дозволяє підвищити ефективність експлуатації колісних пар за рахунок збільшення кількості ремонтних циклів та зниження сумарних витрат життєвого циклу.

Методика дослідження спрямована на розроблення науково обґрунтованого підходу до вибору раціонального способу відновлення коліс рухомого складу при значному підрізі гребеня. Основою методики є комплексний аналіз взаємозв'язку між геометричними параметрами зносу гребеня, обсягом матеріалу, що видаляється або відновлюється, та залишковим ресурсом колеса після виконання відновлювальних операцій.

У межах дослідження розглядаються три основні способи відновлення:

- традиційне перепрофілювання (обточування) до стандартного профілю;
- економічне (часткове) перепрофілювання із зменшеною товщиною гребеня;
- відновлення гребеня шляхом наплавлення.

Для кількісної оцінки ступеня підрізу гребеня введено безрозмірний параметр:

$$\delta_f = \frac{t_{nom} - t_{fact}}{t_{nom}}, \quad (1)$$

де t_{nom} – номінальна товщина гребеня колеса;

t_{fact} – фактична товщина гребеня.

Даний параметр характеризує відносну глибину підрізу гребеня та дозволяє уніфікувати оцінку стану колеса незалежно від типу профілю.

Зменшення діаметра колеса при перепрофілюванні визначається як

$$\Delta D = D_0 - D_1, \quad (2)$$

де D_0 – початковий діаметр колеса;

D_1 – діаметр після відновлення профілю.

Величина ΔD є ключовим параметром, що визначає втрату ресурсу колеса, оскільки кожне перепрофілювання зменшує можливу кількість наступних ремонтних циклів.

Залишковий ресурс колеса після відновлення визначається як функція від: зменшення діаметра ΔD ; умов експлуатації; обраного способу відновлення.

У загальному вигляді

$$L_{res} = f(\Delta D, I_{wear}, \delta_f), \quad (3)$$

де I_{wear} – інтенсивність подальшого зносу гребеня.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Інтенсивність зносу визначимо як

$$I_{wear} = \frac{\Delta h}{L}, \quad (4)$$

де Δh – зміна товщини гребеня;

L – пробіг колісної пари.

Цей параметр залежить від геометрії профілю після відновлення; умов контакту колесо–рейка; експлуатаційних факторів (кривизна колії, мащення, навантаження).

Для вибору раціонального способу відновлення запропоновано інтегральний критерій ефективності відновлення

$$K = \frac{L_{res}}{\Delta D \cdot I_{wear}} \cdot \frac{1}{\delta_f}. \quad (5)$$

Критерій враховує довговічність після ремонту (L_{res}); втрати матеріалу при зміні діаметру колеса (ΔD); швидкість повторного зносу (I_{wear}); ступінь підрізу гребеня (δ_f). Максимальне значення K відповідає найбільш ефективному способу відновлення (рис. 2).

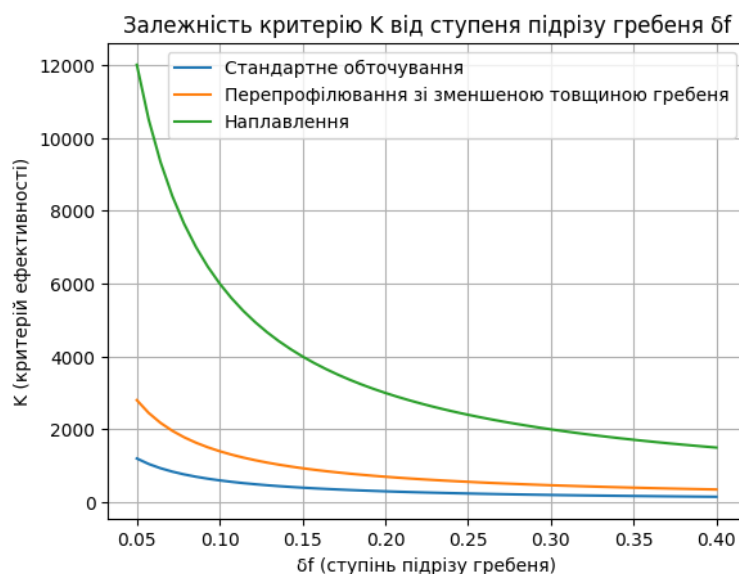


Рис. 2. Залежність інтегрального критерію K від ступеня підрізу гребеня δ_f для різних способів відновлення

Як видно з рис. 2, зі збільшенням ступеня підрізу гребеня δ_f значення критерію ефективності K зменшується для всіх способів відновлення. Найбільш різке зниження характерне для стандартного перепрофілювання, що обумовлено значними втратами металу. Метод часткового перепрофілювання демонструє помірну

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

залежність, тоді як наплавлення забезпечує найвищі значення критерію ефективності та найменшу чутливість до зростання зносу.

Під час вибору способу відновлення колеса при підрізі гребеня необхідно враховувати не лише технічну можливість виконання ремонту, а й його економічну доцільність. Один і той самий спосіб може бути технологічно придатним, але економічно неефективним через значні втрати металу, зменшення кількості наступних ремонтних циклів або підвищену інтенсивність повторного зносу.

У зв'язку з цим доцільно оцінювати спосіб відновлення за сукупними приведеними витратами на життєвий цикл колеса після відновлення.

Пропонується використовувати питомі витрати на одиницю залишкового ресурсу, як цільову функцію – основний економічний показник

$$E_i = \frac{C_i}{L_{res,i}}, \quad (6)$$

де E_i – питомі витрати для i -го способу відновлення, грн/км;

C_i – сукупні витрати на відновлення та подальшу експлуатацію колеса після застосування i -го способу, грн;

$L_{res,i}$ – залишковий ресурс колеса після відновлення, км.

Рациональним вважається той спосіб, для якого значення E_i є мінімальним

$$E_i \rightarrow \min.$$

Сукупні витрати на відновлення пропонується визначати як

$$C_i = C_{r,i} + C_{m,i} + C_{d,i} + C_{w,i} + C_{risk,i}, \quad (7)$$

де $C_{r,i}$ – прямі витрати на виконання ремонту;

$C_{m,i}$ – витрати, пов'язані з втратою металу колеса;

$C_{d,i}$ – витрати, пов'язані з простоем рухомого складу;

$C_{w,i}$ – витрати на подальше відновлення коліс в експлуатації;

$C_{risk,i}$ – очікувані витрати, пов'язані з ризиком передчасного повторного ремонту або браку.

Прямі витрати на відновлення

$$C_{r,i} = C_{lab,i} + C_{eq,i} + C_{mat,i} + C_{en,i}, \quad (8)$$

де $C_{lab,i}$ – витрати на оплату праці;

$C_{eq,i}$ – витрати на використання обладнання;

$C_{mat,i}$ – витрати на матеріали;

$C_{en,i}$ – витрати на енергоносії.

Для стандартного перепрофілювання матеріальні витрати зазвичай мінімальні, але високими можуть бути втрати металу. Для наплавлення, навпаки, прямі витрати вищі через присадний матеріал, підготовку поверхні та термічні режими.

Одним із ключових елементів моделі є економічна оцінка втрати металу, яка прямо пов'язана зі зменшенням діаметра колеса.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

$$C_{m,i} = c_D \cdot \Delta D_i, \quad (9)$$

де c_D – вартість 1 мм зменшення діаметра колеса, грн/мм;

ΔD_i – зменшення діаметра колеса після i -го способу відновлення, мм.

Цей компонент є принципово важливим, оскільки кожне зменшення діаметра знижує потенційну кількість майбутніх ремонтних циклів і наближає колесо до вибракування.

Витрати на простій можна визначити так

$$C_{d,i} = c_t \cdot T_i, \quad (10)$$

де c_t – вартість 1 години простою, грн/год;

T_i – тривалість виконання ремонту, год.

Для перепрофілювання T_i зазвичай менший, ніж для наплавлення, але цей ви-
гаш у часі не завжди компенсує втрату ресурсу.

Подальше зношування колеса після відновлення також має економічний зміст, оскільки воно визначає частоту повторних відновлень. Пропонується оцінювати його як

$$C_{w,i} = c_w \cdot I_{wear,i} \cdot L_{res,i}, \quad (11)$$

де c_w – коефіцієнт економічної оцінки наслідків зносу;

$I_{wear,i}$ – інтенсивність зносу після відновлення, мм/км;

$L_{res,i}$ – ресурс після відновлення, км.

Якщо спосіб відновлення має підвищену ймовірність повторного дострокового ремонту або дефектоутворення, це доцільно враховувати через ризикову складову

$$C_{risk,i} = p_i \cdot C_{rep}, \quad (12)$$

де p_i – ймовірність передчасного повторного ремонту;

C_{rep} – вартість повторного ремонту або заміни.

Ця складова особливо важлива для наплавлення, якщо існує ризик тріщиноутворення або нестабільної якості відновленого шару.

Підставивши всі складові в основний економічний показник, отримаємо

$$E_i = \frac{C_{lab,i} + C_{eq,i} + C_{mat,i} + C_{en,i} + c_D \cdot \Delta D_i + c_t \cdot T_i + c_w \cdot I_{wear,i} \cdot L_{res,i} + p_i \cdot C_{rep}}{L_{res,i}}. \quad (13)$$

Цей показник дозволяє порівнювати різні способи відновлення за критерієм мінімуму питомих витрат на одиницю залишкового ресурсу.

Розроблений технічний критерій K поєднаємо з економічною моделлю. Тоді можна використовувати двокритеріальний підхід:

1. Технічна ефективність

$$K_i = \frac{L_{res,i}}{\Delta D_i \cdot I_{wear,i}} \cdot \frac{1}{\delta_f}. \quad (14)$$

2. Економічна ефективність

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

$$E_i = \frac{C_i}{L_{res,i}}. \quad (15)$$

Раціональним вважається спосіб, для якого: K_i – максимальне; E_i – мінімальне.

Розглянемо три способи відновлення: стандартне перепрофілювання, часткове перепрофілювання і наплавлення і прийнемо основні показники для розрахунку основного економічного показника (табл. 1).

Таблиця 1. – Вхідні показники для розрахунку основного економічного показника

Показник	Стандартне обточування	Часткове перепрофілювання	Наплавлення
C_{lab} , грн	1200	1400	2200
C_{eq} , грн	800	900	1500
C_{mat} , грн	100	150	1800
C_{en} , грн	250	300	600
ΔD , мм	8	5	2
c_D , грн/мм	500	500	500
T , год	3	4	8
c_t , грн/год	400	400	400
I_{wear} , мм/1000 км	0,025	0,020	0,015
L_{res} , тис. км	120	140	180
p_i	0,03	0,04	0,08
$C_{тер}$, грн	12000	12000	12000
c_w , грн/(мм)	20000	20000	20000

Розрахунок питомих витрат економічної моделі для трьох способів відновлення коліс показано в табл. 2.

Таблиця 2. – Питомі витрати основних видів відновлення коліс

Спосіб відновлення	Сукупні витрати, грн	Залишковий ресурс, км	Питомі витрати, грн/км
Стандартне обточування	67 910	120 000	0,566
Часткове перепрофілювання	63 330	140 000	0,452
Наплавлення	65 260	180 000	0,363

Запропонована методика повинна реалізовуватись у такій послідовності:

1. Вимірювання геометричних параметрів колеса (товщина гребеня, діаметр).
2. Визначення ступеня підрізу гребеня δ_f .
3. Розрахунок можливого зменшення діаметра ΔD для кожного способу відновлення.

4. Оцінка інтенсивності подальшого зносу I_{wear} .
5. Визначення залишкового ресурсу L_{res} .
6. Обчислення критерію K для кожного варіанта.
7. Вибір способу відновлення, що забезпечує максимальне значення K .

Методика дозволяє враховувати реальний стан колеса, а не лише нормативні параметри, оцінювати доцільність переходу від перепрофілювання до наплавлення, прогнозувати ефективність відновлення з урахуванням експлуатаційних умов. Запропонований підхід може бути використаний як основа для розроблення систем підтримки прийняття рішень у депо та ремонтних підприємствах.

Результати розрахунків показали, що при значному підрізі гребеня найменше значення питомих витрат має відновлення гребеня наплавленням, незважаючи на вищі прямі витрати. Це пояснюється мінімальними втратами металу та найбільшим залишковим ресурсом. Таким чином, економічна модель підтверджує доцільність використання наплавлення при значному зносі гребеня, тоді як традиційне перепрофілювання є доцільним лише за малих значень підрізу (рис. 3).

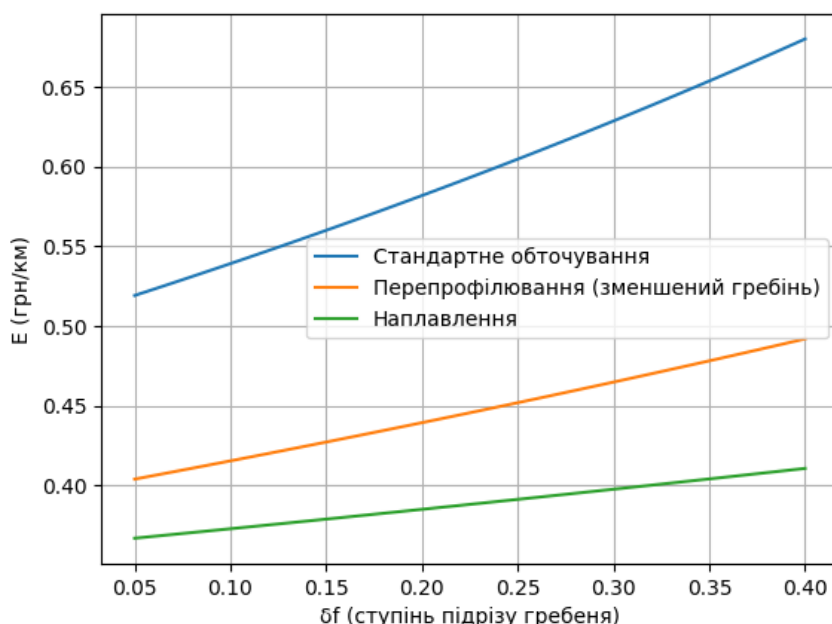


Рис. 3. Залежність критерію ефективності K від ступеня підрізу гребеня δ_f для різних способів відновлення коліс

З рис. 3 видно, що зі збільшенням ступеня підрізу гребеня δ_f значення критерію ефективності K зменшується для всіх способів відновлення. Найбільш різке зниження характерне для стандартного перепрофілювання, що обумовлено значними втратами металу. Метод часткового перепрофілювання демонструє помірну залежність, тоді як наплавлення забезпечує найвищі значення критерію ефективності та найменшу чутливість до зростання зносу.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Після визначення чисельних значень ступеня підрізу гребеня розроблено карту рішень (рис. 4), на якій зображені раціональні області відновлення з граничними ступеня підрізу гребеня колеса.

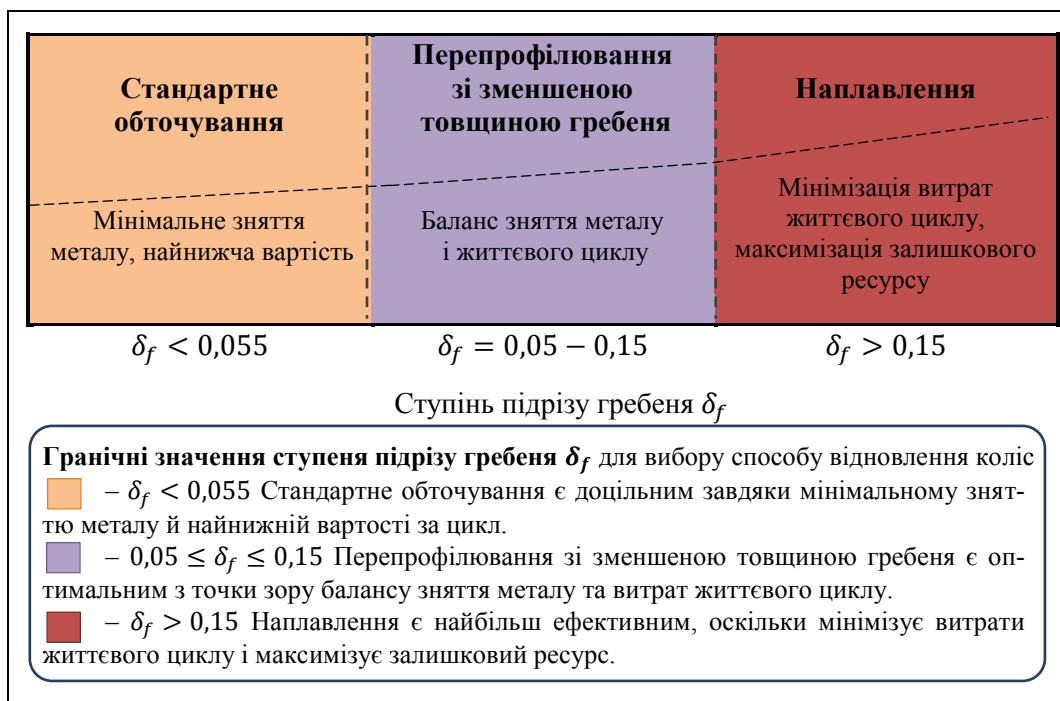


Рис. 4. Карта рішень для основних видів відновлення коліс

Отримана карта рішень показує, що ефективність способу відновлення не є сталою, а суттєво залежить від ступеня зносу гребеня. При цьому традиційні технології, які є ефективними при незначному зносі, втрачають свою доцільність при переході до наднормативного рівня зносу. Запропонована карта рішень дозволяє: формалізувати процес вибору способу відновлення; враховувати як технічні, так і економічні фактори; визначати межі раціонального застосування різних технологій; мінімізувати втрати металу та витрати життєвого циклу.

На відміну від існуючих підходів, запропонована карта рішень базується на інтегральному техніко-економічному критерії та дозволяє перейти від вибору окремої технології до обґрунтованого вибору раціонального способу відновлення залежно від ступеня зносу гребеня.

Висновки. У роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу обґрунтування вибору способу відновлення коліс залізничного рухомого складу при наднормативному зносі гребеня на основі техніко-економічного підходу.

1. Проведено аналіз сучасних наукових досліджень, який показав, що існуючі роботи зосереджені переважно на дослідженні механізмів зносу, динаміки взаємодії «колесо–рейка», прогнозуванні зносу та розробленні окремих технологій відновлення коліс. Встановлено, що питання комплексного обґрунтування вибору способу відновлення при наднормативному зносі гребеня на основі інтегрального техніко-економічного критерію залишається недостатньо дослідженим.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

2. Розроблено технічний критерій ефективності відновлення коліс, який враховує залишковий ресурс, втрати металу внаслідок зменшення діаметра колеса, інтенсивність подальшого зносу та ступінь підрізу гребеня. Запропонований критерій дозволяє оцінювати ефективність способів відновлення з позиції забезпечення максимально можливого ресурсу при мінімальних втратах матеріалу.

3. Сформовано економічний критерій, що базується на визначенні питомих витрат на одиницю залишкового ресурсу та враховує прямі витрати на відновлення, втрати металу, витрати на простій, подальший знос і ризики повторного ремонту. Це дозволяє оцінювати способи відновлення з урахуванням витрат життєвого циклу колеса.

4. Виконано порівняльний аналіз основних способів відновлення коліс – стандартного відновлення, часткового перепрофілювання зі зменшеною товщиною гребеня та наплавлення. Встановлено, що зі збільшенням ступеня підрізу гребеня технічна ефективність перепрофілювання знижується, а економічні витрати зростають, що обумовлено значними втратами металу та скороченням ресурсу колеса.

5. Розроблено карту рішень, яка визначає раціональні області застосування різних способів відновлення залежно від ступеня зносу гребеня. Показано, що при незначному зносі доцільним є стандартне перепрофілювання, при середньому – перепрофілювання зі зменшеною товщиною гребеня, а при наднормативному зносі найбільш ефективним є наплавлення.

6. Доведено, що використання техніко-економічного критерію дозволяє забезпечити оптимальне поєднання технічної ефективності та економічної доцільності, а також мінімізувати втрати металу і витрати на експлуатацію коліс рухомого складу.

Отримані результати можуть бути використані:

- у вагонних та локомотивних депо для обґрунтованого вибору способу відновлення коліс залежно від ступеня їх зносу;
- на ремонтних підприємствах при плануванні технологічних процесів відновлення колісних пар;
- у системах технічної діагностики та моніторингу стану коліс для автоматизації прийняття рішень щодо ремонту;
- при розробленні нормативних документів та рекомендацій щодо допустимих меж зносу та раціональних способів відновлення;
- у наукових дослідженнях, спрямованих на подальше вдосконалення моделей зносу та оптимізації життєвого циклу коліс.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на уточнення граничних значень ступеня зносу гребеня для переходу між способами відновлення, врахування динаміки взаємодії «колесо–рейка» у критеріях ефективності, а також інтеграцію запропонованого підходу з системами цифрового моніторингу стану рухомого складу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сапронова С.Ю., Ткаченко В.П., Зуб Є.П. Ресурсозбереження при відновленні коліс рухомого складу залізниць. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. Северодонецьк: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2017. № 3 (233). С. 183–189. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VSUNU_2017_3_36
2. Andrade A. R., Stow J. Assessing the potential cost savings of introducing the maintenance option of economic tyre returning in Great Britain railway wheelsets. *Reliability Engineering & System Safety*. 2017. Vol. 168. P. 317–325. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.05.033>

3. Co0 B. C., Lee V.J. Railway vehicle wheel restoration by submerged arc welding and its characterization. *Surfaces*. 2020. 1(52), 250–263. DOI: <https://doi.org/10.3390/sci1020052>
4. Muhamedsalih Y., Bevan A., Stow J. Wheel wear and rail damage prediction for wheels turned with thin flanges. In *Proceedings of the 11th World Congress on Railway Research*. 2016. Milan, Italy. University of Huddersfield Repository.
5. Muhamedsalih Y., Stow J., Bevan A. Use of railway wheel wear and damage prediction tools to improve maintenance efficiency through the use of economic tyre returning. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2019. Vol. 233. Iss. 1. P. 590–602. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409718781127>
6. Muhamedsalih Y., Tucker G., Stow J. Optimisation of wheelset maintenance by using a reduced flange wear wheel profile. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2023. Vol. 237 Iss. 3. P. 309–324. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544097221105959>
7. Pires A. C., Pacheco L. A., Braghin F., Silva M. M., Santos G. F. The effect of railway wheel wear on reprofiling and service life. *Wear*. 2021. 477, Article 203798. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203799>
8. Tao G., Wang K., Ren D., Wen Z., Jin X., Li Z., Wang H., Liu Q. Understanding and treatment of severe flange wear of metro train wheels. *Vehicle System Dynamics*, 2023. 61(9). P. 2415–2438. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2022.2117057>
9. Wang D., Yan X., Wang K., Zhu M., Li Z. Analysis of the wear performance of thin flange wheel for high-speed trains. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2025. 77(6), P. 971–983. DOI: <https://doi.org/10.1108/ILT-10-2024-0401>
10. Zhu Y., Yang Y., Mu X., Wang W., Lewis R. Study on wear and RCF performance of repaired damage railway wheels: Assessing laser cladding to repair local defects on wheels. *Wear*, 2019. Vol. 430–431. Article 202946. P. 126–136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.04.028>
11. Magel E., Kalousek J., Caldwell R. A numerical simulation of wheel wear. *Wear*. 2005. Vol. 258. Iss. 7–8. P. 1245–1254. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.033>
12. Ekberg A. Kabo, E. Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading – an overview. *Wear*. 2005. Vol. 258. Iss. 7–8. P. 1288–1300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.039>
13. Magel E., Kalousek J. 2017. Designing and assessing wheel/rail profiles for improved rolling contact fatigue and wear performance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2017. Vol. 231. Iss. 7. P. 805–818. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409717708079>
14. Lewis R., Olofsson U. Wheel–rail interface handbook (2nd ed.). *Woodhead Publishing*. 2019. 842 p. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/widfio>
15. Innocenti A., Marini L., Meli E., Pallini G. Rindi A. Development of a wear model for the analysis of complex railway networks. *Wear*. 2014. Vol. 309. Iss. 1–2. P. 174–191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.010>
16. Ringsberg J. W. Life prediction of rolling contact fatigue crack initiation and propagation in railway wheels. *International Journal of Fatigue*. 2001. Vol. 23. Iss. 7. P. 575–586. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00024-X](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00024-X)
17. Łuczak B., Firlík B., Staśkiewicz T., Sumelka W. Numerical algorithm for predicting wheel flange wear in trams – validation in a curved track. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2020. Vol. 234 Iss. 10. P. 1156–1169. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409719882807>
18. Sapronova S., Tkachenko V., Braikovska N., Zub Y. Scientific approach to the methods of increasing the lifecycle of wheels of railway vehicles. *Transport Systems and Technologies*. 2021. Iss. 38. P. 164–172. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-161-15>
19. Bosso N., Gugliotta A., Abeidi A. S. Influence of wheel and rail profiles on rail vehicle dynamics and wear behaviour. *Vehicle System Dynamics*. 2018. Vol. 13. No. 6. P. 3540–3549. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2019.1589536>

S. Yu. Sapronova

National Transport University,

Omelianovycha-Pavlenka str. 1, 01010, Kyiv, Ukraine

Tel.: +380505834854, E-mail: doc.sapronova@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1482-1665>

O. V. Vorobiov

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University
17 Ioanna Pavla II Str., Kyiv, 01042, Ukraine
Tel.: +380500527950, E-mail: vorobjov_o@snu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6546-4434>

A TECHNICAL-ECONOMIC APPROACH TO SELECTING WHEEL RESTORATION METHODS FOR RAILWAY ROLLING STOCK UNDER FLANGE WEAR BEYOND ALLOWABLE LIMITS

The purpose of this study is to justify the selection of a wheel restoration method for railway rolling stock under flange wear beyond allowable limits based on a technical-economic criterion that considers both technical efficiency and life cycle costs.

The study is based on an analytical approach combining recent research in economic reprofiling, wheel profile optimization, local restoration by welding, and diagnostics of flange wear mechanisms. An integral technical criterion is proposed, taking into account flange wear, wheel diameter reduction, wear intensity, and residual life after restoration. In addition, an economic criterion based on specific life cycle costs per unit of residual life is developed.

A comparative analysis of three restoration methods – standard reprofiling, reduced flange reprofiling, and welding – is performed. The dependencies of technical and economic criteria on flange wear are obtained, and a decision map defining rational application areas for each method is developed. It is shown that with increasing flange wear, the efficiency of conventional reprofiling decreases due to excessive material removal and reduced wheel life. Welding is found to be the most effective method under flange wear beyond allowable limits, ensuring the best balance between technical performance and economic efficiency.

A technical-economic approach to selecting wheel restoration methods under flange wear beyond allowable limits is proposed, integrating an efficiency criterion, an economic model, and a decision map.

The results can be applied in railway depots, maintenance facilities, and repair enterprises, as well as in the development of guidelines and standards for rational wheel restoration.

Keywords: railway transport, railway wheel, flange wear beyond allowable limits, reprofiling, surfacing, decision-making criterion.

REFERENCES

1. Sapronova, S. Yu., Tkachenko, V. P., & Zub, Ye. P. (2017). Resursozberezhennya pry vidnovlenni kolis rukhomoho skladu zaliznyts'. [Resource saving at restoring of railway rolling stock wheels]. *Visnyk Skhidnoukrayins'koho natsional'noho universytetu im. V. Dalya*. – Scientific journals of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 3(233), 183–189. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VISUNU_2017_3_36
2. Andrade, A. R., & Stow, J. (2017). Assessing the potential cost savings of introducing the maintenance option of economic tyre turning in Great Britain railway wheelsets. *Reliability Engineering & System Safety*, 168, 317–325. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.05.033>

3. Coo, B. C., & Lee, D. (2020). Railway vehicle wheel restoration by submerged arc welding and its characterization. *Surfaces*, 1(52), 250–263. DOI: <https://doi.org/10.3390/sci1020052>
4. Muhamedsalih, Y., Bevan, A., & Stow, J. (2016). Wheel wear and rail damage prediction for wheels turned with thin flanges. In *Proceedings of the 11th World Congress on Railway Research*, Milan, Italy. University of Huddersfield Repository.
5. Muhamedsalih, Y., Stow, J., & Bevan, A. (2019). Use of railway wheel wear and damage prediction tools to improve maintenance efficiency through the use of economic tyre turning. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 233(1), 590–602. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409718781127>
6. Muhamedsalih, Y., Tucker, G., & Stow, J. (2023). Optimisation of wheelset maintenance by using a reduced flange wear wheel profile. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 237(3), 309–324. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544097221105959>
7. Pires, A. C., Pacheco, L. A., Braghin, F., Silva, M. M., & Santos, G. F. (2021). The effect of railway wheel wear on reprofiling and service life. *Wear*, 477, Article 203798, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203799>
8. Tao, G., Wang, K., Ren, D., Wen, Z., Jin, X., Li, Z., Wang, H., & Liu, Q. (2023). Understanding and treatment of severe flange wear of metro train wheels. *Vehicle System Dynamics*, 61(9), 2415–2438. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2022.2117057>
9. Wang, D., Yan, X., Wang, K., Zhu, M., & Li, Z. (2025). Analysis of the wear performance of thin flange wheel for high-speed trains. *Industrial Lubrication and Tribology*, 77(6), 971–983. DOI: <https://doi.org/10.1108/ILT-10-2024-0401>
10. Zhu, Y., Yang, Y., Mu, X., Wang, W., & Lewis, R. (2019). Study on wear and RCF performance of repaired damage railway wheels: Assessing laser cladding to repair local defects on wheels. *Wear*, 430–431, Article 202946. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.04.028>
11. Magel, E., Kalousek, J., & Caldwell, R. (2005). A numerical simulation of wheel wear. *Wear*, 258(7-8), 1245–1254. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.033>
12. Ekberg, A., & Kabo, E. (2005). Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading – an overview. *Wear*, 258(7-8), 1288–1300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.039>
13. Magel, E., & Kalousek, J. (2017). Designing and assessing wheel/rail profiles for improved rolling contact fatigue and wear performance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 231(7), 805–818. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409717708079>
14. Lewis, R., & Olofsson, U. (2019). Wheel–rail interface handbook (2nd ed.). *Woodhead Publishing*. 842. Retrieved from: <https://surl.li/widfio>
15. Innocenti, A., Marini, L., Meli, E., Pallini, G. & Rindi, A. (2014). Development of a wear model for the analysis of complex railway networks. *Wear*, 309, 1–2, 174–191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.010>
16. Ringsberg, J. W. (2001). Life prediction of rolling contact fatigue crack initiation and propagation in railway wheels. *International Journal of Fatigue*, 23, 7, 575–586. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00024-X](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00024-X)
17. Łuczak, B., Firlik, B., Staśkiewicz, T., & Sumelka, W. (2020). Numerical algorithm for predicting wheel flange wear in trams – validation in a curved track. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 234(10), 1156–1169. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409719882807>
18. Saponova, S., Tkachenko, V., Braikovska, N., & Zub, Y. (2021). Naukovyi pidkhid do metodiv zbilshennia zhyttievoho tsyklu kolisnykh par rukhomoho skladu zaliznyts. [Scientific approach to the methods of increasing the life cycle of wheels of railway vehicles]. *Transportni systemy ta tekhnolohii – Transport Systems and Technologies*, 38, 164–172. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-161-15>
19. Bosso N., Gugliotta A., & Abeidi A. S. (2018). Influence of wheel and rail profiles on rail vehicle dynamics and wear behaviour. *Vehicle System Dynamics*. 13(6), 3540–3549. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2019.1589536>



Стаття надійшла 17.04.2026
Стаття прийнята 22.04.2026
Опубліковано 29.05.2026

А. С. Маслій

Український державний університет залізничного транспорту
майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Тел.: +380974137970, E-mail: maslij@kart.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0554-8150>

В. А. Геврасьов

Український державний університет залізничного транспорту
майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Тел.: +380932563660, E-mail: gevasov_phd@kart.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8910-5172>

Р. М. Антоненко

Український державний університет залізничного транспорту
майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Тел.: +380632257218, E-mail: antonenko_phd@kart.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9241-5857>

Я. В. Якубовський

Український державний університет залізничного транспорту
майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Тел.: +380974460052, E-mail: 11li@i.ua
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7833-6604>

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МАКРОДИНАМІКИ РЕЙКОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ З БАГАТОДВИГУННИМ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

Стаття присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми підвищення точності та достовірності математичного моделювання макродинаміки тягового рухомого складу. Головною метою дослідження є розробка узагальненої математичної моделі руху поїзда, яка здатна комплексно описувати нестационарні процеси в тяговому електроприводі та зоні фрикційного контакту «колесо-рейка» в режимах тяги і гальмування. В основі запропонованого рішення лежить інтегрований підхід до опису електромеханічних та фрикційних систем із застосуванням трирівневої архітектури моделювання: мікродинаміка на рівні окремої осі, сумація зусиль на рівні секції або візка та макродинаміка поїзда в цілому. В роботі обґрунтовано доцільність застосування оптимізованої одномасової розрахункової схеми механічної частини тягового електроприводу для задач оцінки енергоефективності, розрахунку гальмівних шляхів та загального руху ділянкою.

Вдосконалено комплексну систему диференціальних рівнянь, яка об'єднує підсистеми формування сили тяги, механічного та електричного гальмування,

© Маслій А. С., Геврасьов В. А., Антоненко Р. М., Якубовський Я. В., 2026

а також опору руху. Суттєво удосконалено математичний опис фрикційної взаємодії шляхом представлення коефіцієнта зчеплення як нелінійної функції одночасно від лінійної швидкості руху екіпажу та швидкості проковзування колісної пари. На основі цього побудовано просторові (3D) характеристики коефіцієнта тертя для різних типів локомотивів.

Розроблена модель дозволяє адекватно відтворювати нестационарні режими втрати зчеплення (боксування, юз) та перехід від тертя спокою до тертя ковзання в єдиному розрахунковому контурі. Універсальність математичного апарату забезпечує його легке масштабування та адаптацію до маневрових, вантажних, пасажирських та високошвидкісних поїздів з розподіленою тягою, що створює надійне підґрунтя для оптимізації алгоритмів мікропроцесорних систем керування тягою і протиюзним захистом.

Ключові слова: математичне моделювання, багатодвигунний тяговий рухомий склад, тяговий електропривод, контакт «колесо-рейка», коефіцієнт зчеплення, швидкість проковзування.

Вступ. Оцінка експлуатаційних показників тягового рухомого складу вимагає детального моделювання руху поїзда на заданій ділянці колії. Використання точних математичних моделей та врахування реальних параметрів інфраструктури (профіль, план колії, стан поверхонь) дозволяють суттєво підвищити достовірність результатів досліджень. Важливою ланкою перевізного процесу є як маневрова та вивізна робота, так і магістральні вантажні та високошвидкісні пасажирські перевезення. Тому підвищення ефективності функціонування сучасних локомотивів та моторвагонного рухомого складу є актуальним завданням сучасної транспортної науки.

Постановка проблеми. Ефективність експлуатації сучасного тягового рухомого складу визначається складною взаємодією механічних, електромеханічних та фрикційних процесів, що відбуваються як у тяговому електроприводі, так і в зоні контакту «колесо-рейка». Особливу роль у формуванні тягових і гальмівних зусиль відіграють нестационарні явища, зокрема боксування та юз, які виникають унаслідок зміни умов зчеплення та перерозподілу навантаження між колісними парами.

Існуючі підходи до математичного моделювання руху поїзда, як правило, базуються на спрощених уявленнях про коефіцієнт зчеплення, подаючи його як функцію швидкості руху або задаючи емпірично. Такий підхід є прийнятним для установлених режимів, однак не забезпечує адекватного опису перехідних процесів, у яких визначальним є взаємозв'язок між швидкістю руху та швидкістю проковзування.

Крім того, більшість моделей розглядає динаміку поїзда та процеси у тяговому електроприводі ізолювано, що обмежує можливість комплексного аналізу їх взаємного впливу. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки узагальненої математичної моделі, здатної інтегрувати зазначені процеси в єдиному розрахунковому контурі з урахуванням нестационарної фрикційної взаємодії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням моделювання динаміки руху поїзда та взаємодії рухомого складу з колією присвячено значну кількість праць. Вплив стану поверхні рейок на реалізацію сили тяги та моделювання профілю колії розглядалися у роботах В. П. Ткаченка та співавторів [1] та В. С. Ноженка [2]. Методику вдосконалення тягових розрахунків на базі переоцінки впливу фактичного профілю колії на рухомий склад запропоновано у дослідженні М. А. Барібіна та співавторів [3]. Дослідження процесів боксування та юзу, а також їх впливу

на перехідні процеси розгону та гальмування, ґрунтовно висвітлені Я. В. Болжеларським [4] та Д. В. Бобирем та співавторами [5]. У роботі [6] запропоновано підхід до моделювання динаміки взаємодії системи «рухомий склад – інфраструктура» на основі тривимірного методу скінченних елементів із урахуванням нелінійного контакту «колесо-рейка». Отримані результати дозволяють уточнити вплив контактних сил та деформацій на формування опору руху та динамічних навантажень у системі.

Значний внесок у математичне моделювання електромеханічних процесів тягового привода та мікропроцесорних систем векторного і прямого керування моментом тягових двигунів зробили Б. Г. Любарський, С. В. Гулак та співавтори [7, 8, 9]. Оцінка енергоефективності саме гібридних локомотивів та модернізованого моторвагонного рухомого складу з гібридними силовими установками розкрита у працях Е. Д. Тартаковського [10] та у сучасних дослідженнях колективу авторів під керівництвом Є. С. Рябова [11]. Питання фрикційної взаємодії та оцінки коефіцієнта зчеплення досліджувалися М. І. Петруковцем [12], С. С. Мямліним [13], а також іноземними вченими (Y. Zhang та інші) [14]. Окремої уваги заслуговує робота Г. С. Ігнатова та співавторів [15], у якій на базі експериментальних даних виведено емпіричну залежність для визначення коефіцієнта зчеплення електропоїздів, обладнаних асинхронним електроприводом та системами протибоксування. Математичні аспекти формування гальмівної сили та питання моделювання механічної частини тягового електроприводу (ТЕП) викладені Є. С. Рябовим [16] та колективом авторів під керівництвом W. Gan [17].

Незважаючи на значний обсяг досліджень, у багатьох математичних моделях макродинаміки поїзда нестаціонарними явищами в контакті «колесо-рейка» (зміна коефіцієнта тертя спокою на тертя ковзання) нехтують, або моделі створюються під вузькоспеціалізованими умовами без можливості адаптації до інших видів локомотивів.

Мета статті. Виділяючи невирішену раніше частину загальної проблеми, метою даної статті є розробка узагальненої деталізованої математичної моделі руху сучасного тягового рухомого складу різних типів (магістральних, маневрових, високошвидкісних та моторвагонних), яка комплексно описує динамічні процеси як безпосередньо у тяговому електроприводі (ТЕП), так і в зоні фрикційного контакту «колесо-рейка» у режимах тяги та гальмування.

Наукова новизна

1. Дістала подальший розвиток узагальнена математична модель руху поїзда, яка, на відміну від існуючих підходів, базується на наскрізній інтеграції нестаціонарних процесів у зоні фрикційного контакту (перехід від тертя спокою до ковзання) та динаміки тягового електроприводу в єдиному розрахунковому контурі.

2. Удосконалено підхід до опису коефіцієнта зчеплення [14, 17], який подано як функцію не лише швидкості руху, а й швидкості проковзування, що дозволяє з достатньою точністю моделювати режими боксування та юзу в перехідних процесах.

3. Отримано інтегровану систему диференціальних рівнянь руху поїзда, яка об'єднує підсистеми:

- формування сили тяги,
- електричного та механічного гальмування,
- опору руху,
- що забезпечує можливість комплексного аналізу динаміки поїзда в різних експлуатаційних режимах.

4. Запропоновано ієрархічну модель із розділенням мікро– та макродинаміки.

5. Обґрунтовано доцільність застосування одномасової моделі механічної частини ТЕП для задач макродинаміки та енергоефективності, що дозволяє зменшити обчислювальну складність без суттєвої втрати точності.

6. Запропоновано підхід до моделювання фрикційної взаємодії у вигляді узагальненої залежності коефіцієнта тертя від швидкості руху та швидкості проковзування, що забезпечує врахування нестационарних режимів зчеплення та імітувати вплив зовнішніх збурень на макрорівні (зміна стану поверхні рейок, подача піску тощо) без деталізації просторового розподілу сил у колісній парі.

7. Отримані результати створюють основу для підвищення точності моделювання тягових процесів та оптимізації алгоритмів керування сучасним рухомим складом.

Силові фактори та загальна динаміка рухомого складу

Специфіка експлуатації залізничних тягових одиниць залежить від множини чинників, серед яких стан поверхонь тертя (колесо-рейка), ступінь зносу бандажів, а також профіль та план колії [1, 2]. Ці параметри безпосередньо впливають на динаміку та зумовлюють виникнення нестационарних процесів, таких як боксування (проковзування колісної пари відносно рейки в режимі тяги) та юз (блокування коліс під час гальмування) [4]. У багатьох математичних моделях ці явища ігноруються, що негативно позначається на точності відтворення перехідних процесів розгону та гальмування [5]. Тому створення деталізованого математичного апарату, який описує динаміку як у ТЕП, так і в зоні фрикційного контакту, є актуальним науково-технічним завданням.

Під час руху на поїзд діє комплекс внутрішніх та зовнішніх сил [5]. Згідно з законами механіки, внутрішні зусилля є взаємно врівноважені та не визначають її траєкторію. Як проілюстровано на рисунку 1, поступальний рух локомотива залежить виключно від зовнішніх факторів: дотичної сили тяги F_T , гальмівного зусилля B та загального опору руху поїзда W . Для високошвидкісних пасажирських поїздів сила W обов'язково включає домінуючу складову аеродинамічного опору.



Рис. 1. Схема сил, що діють на поїзд у процесі його руху

Спираючись на рисунок 1 та принцип Даламбера, для поїзда як єдиної жорсткої маси базова система диференціальних рівнянь має класичний вигляд [7]:

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

$$\begin{cases} F_T - B - W = m_{\Pi} \frac{dV_{\Pi}}{dt} \\ F_T = f(F_{дв}, F_{зч}) \\ B = f(K, \varphi_K, F_{зч}) \\ W = f(V_{\Pi}, k_w) \end{cases} \quad (1)$$

де F_T – сила тяги рухомого складу, Н;

B – гальмівна сила рухомого складу, Н;

W – сила опору рухомого складу, Н;

m_{Π} – маса поїзду, кг;

V_{Π} – швидкість поїзду, м/с;

$F_{дв}$ – сила тяги двигуна, Н;

$F_{зч}$ – сила зчеплення рухомого складу, Н;

K – сила притискання гальмівних колодок до колеса чи гальмівного диска (регулюється машиністом), Н;

φ_K – коефіцієнт тертя гальмівних колодок з колесом (диском);

k_w – коефіцієнт, що враховує вплив особливостей ділянки шляху, атмосферних умов на силу опору руху.

Аналіз цих рівнянь показує, що головні зусилля, які впливають на рухомий склад (РС) під час руху, є багатопараметричними функціями. Це вимагає поглибленого вивчення механізмів їх формування та взаємодії. Оскільки сучасні локомотиви та моторвагонний РС (МВРС) оснащуються ідентичними електроприводами на кожній колісній парі, раціонально дослідити динаміку одного ТЕП і розподіл зусиль у ньому. Згодом отриману математичну модель можна буде масштабувати на весь тяговий РС (ТРС) відповідно до кількості моторних осей.

МВРС розглядається як система з N елементів (секцій), кожна з яких може мати власний ТЕП або бути причіпною. Рівняння (1) прийме вид

$$\sum_{i=1}^N (F_{T,i} - B_i - W_i) = \sum_{i=1}^N m_i \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

Математична модель побудована за ієрархічним принципом і передбачає декомпозицію системи на три взаємопов'язані рівні. Ієрархічна структура представлена на рисунку 2. На рівні колісної пари описуються електромеханічні процеси в тяговому електроприводі та формування сил взаємодії в контакті «колесо–рейка» з урахуванням проковзування. На рівні тягового модуля виконується агрегування зусиль окремих колісних пар у межах візка або вагона з формуванням узагальненого тягового чи гальмівного зусилля. На рівні поїзда визначається поздовжній рух як єдиної механічної системи під дією сумарних зовнішніх сил.

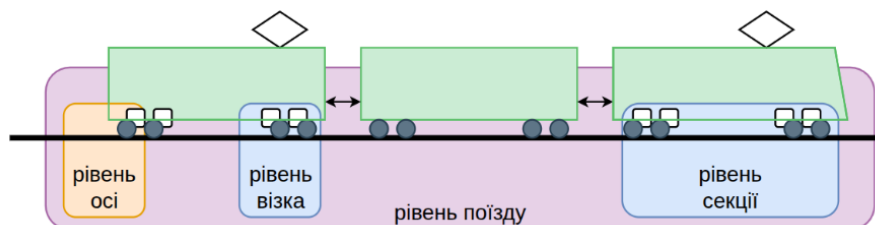


Рис. 2. Ієрархічна структура моделювання динаміки поїзда

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Математичний опис процесу утворення сили тяги рухомого складу

Згідно з сучасними дослідженнями [1, 5] та нормативними правилами тягових розрахунків [18] механізм формування сили тяги відображено на рисунку 3.

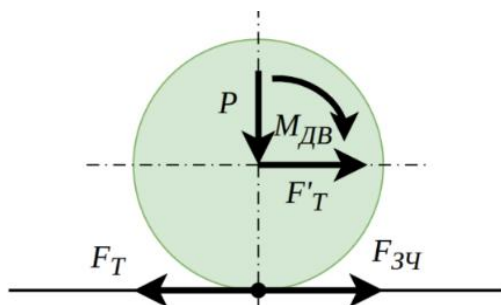


Рис. 3. Процес утворення сили тяги

На рисунку 3 схематично відображено процес трансформації електромагнітного моменту двигуна $M_{ДВ}$ у дотичну рушійну силу. Варто зауважити, що в загальному рівнянні (1) тягове зусилля представлено у вигляді узагальненої сили $F_{ДВ}$, тоді як безпосередній аналітичний зв'язок між моментом двигуна та цією силою (з урахуванням передавального числа редуктора та радіуса колеса) детально розкривається далі у мікродинамічній моделі – рівняння (11). Відповідно до механіки процесу, проілюстрованої на рисунку 3 та системи рівнянь (1), загальне значення сили тяги F_T формується під впливом сили зчеплення $F_{зч\Sigma}$ та сумарного зусилля тягових двигунів $F_{ДВ\Sigma}$. При цьому сила зчеплення $F_{зч}$ виступає фізичним обмежувачем максимальної тяги і безпосередньо залежить від коефіцієнта зчеплення $\varphi_{зч}$ [12].

Слід зазначити, що позначена на кінематичних схемах вертикальна сила P , яка притискає колесо до рейки та формує зону фрикційного контакту, у математичній моделі визначається через статичне та динамічне осьове навантаження m_0g .

У реальних умовах експлуатації навантаження на колісні пари розподіляється нерівномірно через динамічний перерозподіл ваги кузова в перехідних режимах (розгін, гальмування) та під час проходження кривих ділянок колії. Через це сила зчеплення для кожного колеса постійно змінюється і може суттєво відрізнятись [13]. Враховуючи ці фактори, для коректного моделювання макродинаміки загальну силу зчеплення недоцільно розглядати як статичну величину. Базовий розрахунок необхідно вести на рівні кожної окремої колісної пари за таким рівнянням:

$$F_{зчкп} = m_0 g \varphi_{зч}(V_{кп}, v_{пр}) \quad (3)$$

де m_0 – осьове навантаження колісної пари, кг;

g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ;

$\varphi_{зч}$ – коефіцієнт зчеплення колісної пари з рейкою;

$V_{кп}$ – лінійна швидкість обертання колісної пари, м/с ;

$v_{пр}$ – швидкість проковзування колеса, м/с .

Лінійна швидкість обертання колісної пари $V_{кп}$ пов'язана зі швидкістю поїзда та швидкістю проковзування наступним виразом

$$V_{\text{кп}} = V_{\text{п}} + v_{\text{пр}} \quad (4)$$

Водночас, сучасний МВРС характеризується розподіленою тягою, де тягові зусилля генеруються уздовж всього поїзда. У такому випадку розгляд системи як єдиної маси є некоректним через можливу різницю в осьових навантаженнях та стані контактної поверхні для різних вагонів. Тому для поїздів з розподіленою тягою глобальна сила зчеплення формується як сума локальних сил зчеплення по всіх N моторних (зчіпних) осях:

$$F_{\text{зч}\Sigma} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k m_{o,ij} g \varphi_{\text{зч},ij} (V_{\text{кп},ij}, v_{\text{пр},ij}) \quad (5)$$

де $m_{o,ij}$ – осьове навантаження від j -ї колісної пари i -го тягового модуля на рейки, кг;

$\varphi_{\text{зч},ij}$ – локальний коефіцієнт зчеплення для j -ї колісної пари з рейкою;

$V_{\text{кп},ij}$ – лінійна швидкість обертання j -ї колісної пари, м/с;

$v_{\text{пр},ij}$ – швидкість проковзування j -ї колісної пари, м/с;

k – кількість осей в межах одного i -го тягового модуля (візка або секції);

N – загальна кількість елементів (секцій, тягових модулів, вагонів) у складі поїзда.

Залежно від балансу зусиль $F_{\text{зч}\Sigma}$ та $F_{\text{дв}\Sigma}$, друге диференціальне рівняння із системи (1) для ідеалізованого локомотива трансформується таким чином:

$$F_{\text{т}} = \min(F_{\text{дв}\Sigma}, F_{\text{зч}\Sigma}) \quad (6)$$

Однак спрощена формула (6) не враховує явище локального зриву зчеплення. У реальних умовах експлуатації багатодвигунного ТРС кожна колісна пара може перейти в режим боксування незалежно від інших (через локальне забруднення рейки, розвантаження осі тощо). Сучасні мікропроцесорні системи керування тягою реагують на це індивідуальним зменшенням електромагнітного моменту лише на тій осі, що втратила зчеплення, без скидання загальної тяги всього поїзда.

Для адекватного моделювання таких алгоритмів загальна сила тяги $F_{\text{т}\Sigma}$ має обчислюватися не за глобальним мінімумом, а як сума реалізованих зусиль кожної окремої i -ї осі:

$$F_{\text{т}\Sigma} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k \min(F_{\text{дв},ij}, F_{\text{зч},ij}) \quad (7)$$

Значення коефіцієнта зчеплення $\varphi_{\text{зч}}$ не є сталим і визначається станом рейок, лінійною швидкістю екіпажу, швидкістю проковзування, типом ТРС тощо. У класичних роботах з теорії локомотивної тяги [10] та правил тягових розрахунків [18] коефіцієнт зчеплення, як правило, задається у вигляді функції швидкості руху поїзда $V_{\text{п}}$. Такий підхід базується на узагальненні експериментальних даних і використовується для інженерних розрахунків усталених режимів, однак не враховує впливу швидкості проковзування та нестационарних процесів у контакті «колесо-рейка». Графічно такий узагальнений підхід проілюстровано на рисунку 4.

Слід зазначити, що наведені на рисунках 4 та 5 залежності побудовані на основі узагальнених емпіричних співвідношень, адаптованих для різних категорій тягового рухомого складу. При формуванні цих кривих бралися до уваги усереднені значення ключових експлуатаційно-технічних параметрів, зокрема номінальне осьове

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

навантаження, тип застосовуваних гальмівних систем та інші специфічні конструктивні особливості відповідних класів локомотивів і моторвагонних поїздів

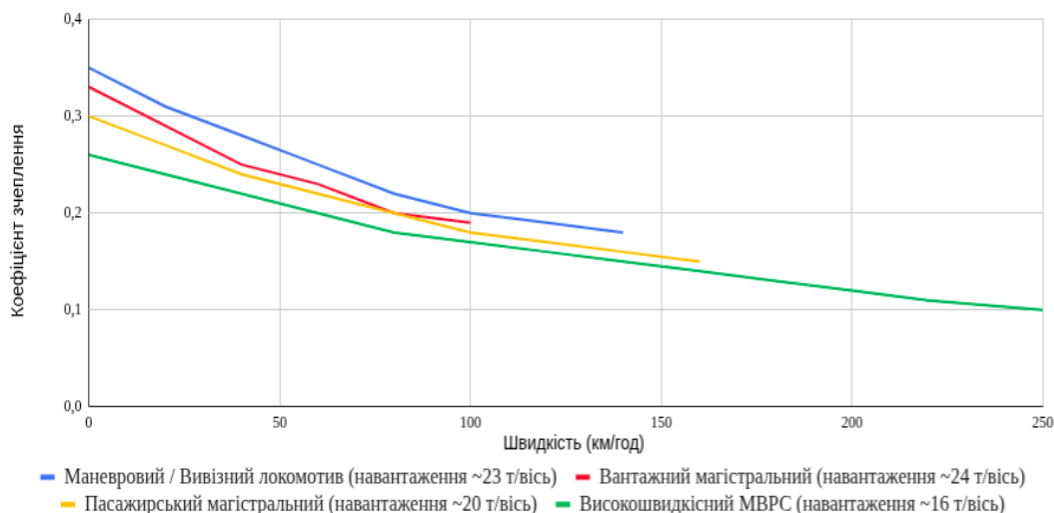


Рис. 4. Залежність коефіцієнта зчеплення $\phi_{зч}$ від швидкості руху поїзда $V_{п}$

Проте така спрощена модель не дозволяє адекватно відтворити процеси ковзання у плямі контакту «колесо-рейка». У разі порушення зчеплення параметр $\phi_{зч}$ (який виступає коефіцієнтом тертя спокою) трансформується у коефіцієнт тертя ковзання $\phi_{тк}$, значення якого має динамічно коригуватися залежно від швидкості проковзування $v_{пр}$ [7].

Математично цей процес описується такою системою рівнянь:

$$\begin{cases} \phi_{зч,ij} = f(V_{п}, \phi_{тк,ij}) \\ \phi_{тк,ij} = \begin{cases} \phi_{зч}(V_{п}), & \text{якщо } v_{пр,ij} = 0 \\ f(v_{пр,ij}), & \text{якщо } v_{пр,ij} \neq 0 \end{cases} \\ v_{пр,ij} = V_{кп,ij} - V_{п} \end{cases} \quad (8)$$

де $\phi_{тк,ij}$ – коефіцієнт тертя ковзання j -ї колісної пари i -го тягового модуля.

Коефіцієнт тертя ковзання може варіюватися в широкому діапазоні від 0,05 до 0,8, що продиктовано фізичним станом контактних площин [10, 13]. Для імітації зовнішніх збурень (потрапляння мастила на рейки, подача піску) значення $\phi_{зч}$ можна штучно змінювати в процесі моделювання. Типова залежність коефіцієнта тертя ковзання $\phi_{тк}$ від швидкості проковзування $v_{пр}$ подана на рисунку 5.

Для створення максимально наочної та точної моделі фрикційної взаємодії необхідно об'єднати залежності з рисунків 4 та 5 у єдину тривимірну поверхню. Зображена на рисунку 6 залежність дозволяє комплексно і глибоко розкрити процеси, що протікають у контакті колеса та рейки.

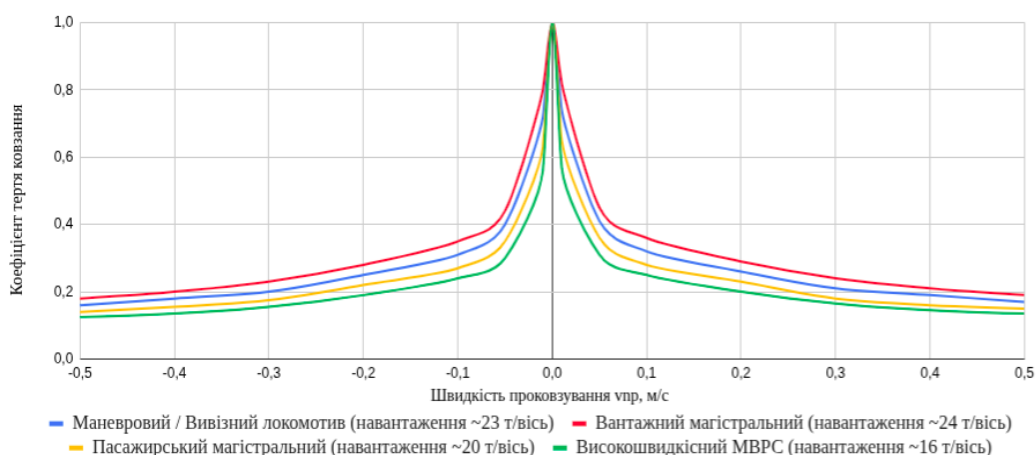


Рис. 5. Залежність коефіцієнта тертя ковзання $\phi_{\text{тк}}$ від швидкості проковзування $v_{\text{пр}}$

Обґрунтування та вибір розрахункової моделі механічної частини

Відповідно до виразу (6), якщо виконується умова $F_{\text{зч}\Sigma} > F_{\text{дв}\Sigma}$, то визначальними для генерації тягового зусилля стають електромагнітні та електромеханічні процеси безпосередньо всередині ТЕП локомотива.

Електропривод є складною системою, де окрім електричної частини та мікропроцесорної системи керування наявний механічний блок, що також вимагає прискриптивного математичного моделювання [16]. Від коректності опису механічної складової прямо залежить загальна адекватність руху ТЕП. У контексті дослідження поїзної роботи детальний аналіз розподілу сил у кінематичній схемі ТЕП є критично важливим, оскільки ця система містить нелінійні навантаження та працює в умовах специфічного контакту з рейкою [17].

Ступінь деталізації механіки ТЕП може бути різним: чим вища складність моделі, тим точнішими є результати, але водночас суттєво зростає час машинних обчислень.

Побудова математичної моделі механіки традиційно стартує з формування її кінематичної схеми. Залежно від конструкції РС, застосовуються різні види підвішування кузова та тягових двигунів (опорно-осьове чи опорно-рамне) з різноманітними передавальними механізмами. Надмірне врахування всіх цих конструктивних нюансів призводить до значного обтяження системи рівнянь, хоча їхній реальний вплив на глобальну динаміку локомотива є відносно малим.

Аналіз сучасного локомотивобудування доводить, що тягова передача з одноступінчастим редуктором є найпоширенішим та найбільш універсальним рішенням [5, 13]. Саме такий варіант механічної передачі енергії взято за основу для подальшого математичного опису. Кінематична схема механічної частини обраного ТЕП представлена на рисунку 7.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

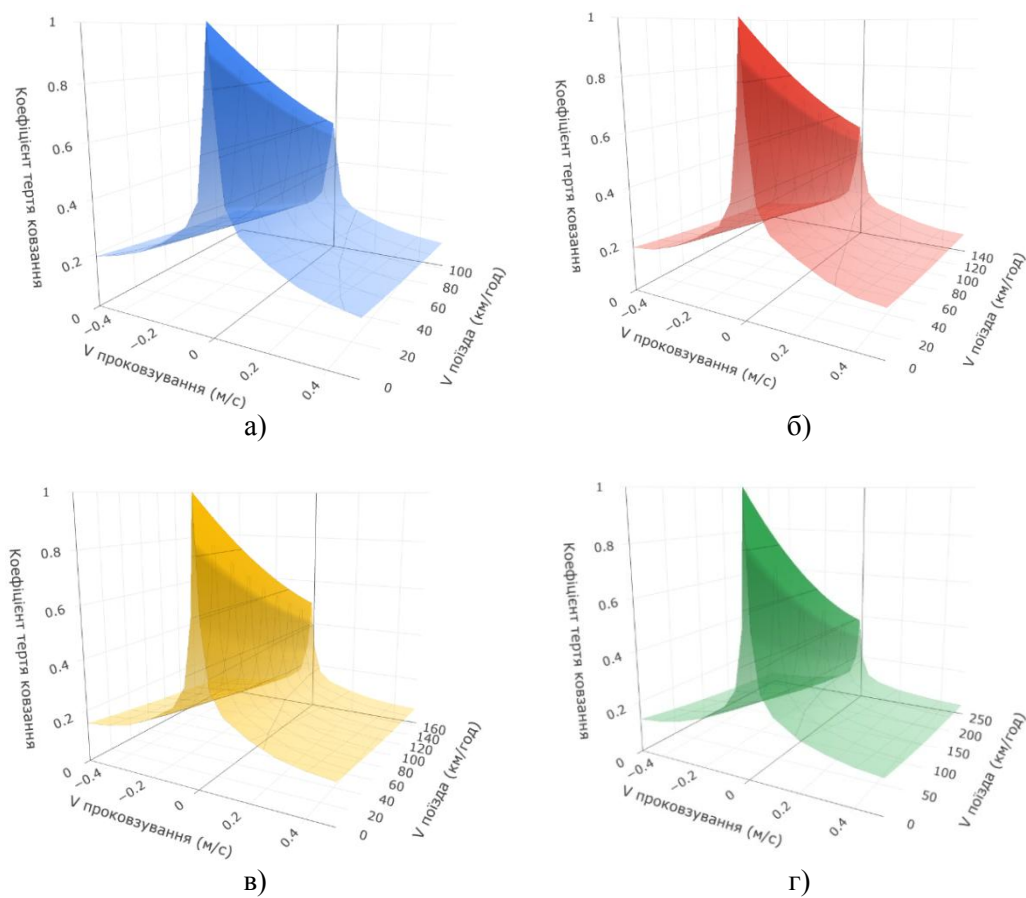


Рис. 6. Деталізоване представлення коефіцієнта зчеплення-ковзання:

- а) маневровий/вивізний локомотив (навантаження 23 т/вісь)
- б) вантажний магістральний (навантаження 24 т/вісь)
- в) пасажирський магістральний (навантаження 20 т/вісь)
- г) високошвидкісний МВРС (навантаження 16 т/вісь)

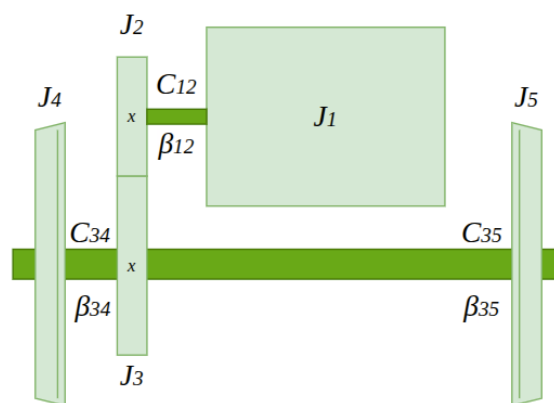


Рис. 7. Кінематична схема ТЕП

На базі кінематичної схеми формується розрахункова модель. Залежно від необхідного ступеня деталізації, розрахункова модель механічної частини може бути одномасовою, двомасовою або трьомасовою:

– Трьомасова модель розділяє інерційні маси ротора тягового двигуна, лівого та правого коліс колісної пари, що з'єднані пружними елементами (віссю та тяговою передачею).

Доцільність використання: Ця модель є безальтернативною при дослідженні просторової динаміки екіпажу в кривих ділянках колії малого радіуса, де ліве та праве колеса проходять різний шлях і виникає скручування колісної осі. Вона також необхідна для аналізу асиметричної втрати зчеплення (наприклад, при потрапленні мастила лише на одну рейку).

Недоліки: Екстремальна математична складність та потреба у великій кількості емпіричних даних (жорсткість осі, точна геометрія контакту тощо), що робить її використання для розрахунку загальної поїзної роботи недоцільним.

– Двомасова модель спрощує систему шляхом об'єднання мас лівого та правого коліс в одну еквівалентну масу колісної пари, яка відокремлена від маси ротора пружним зв'язком (тяговою передачею).

Доцільність використання: Цей підхід є критично важливим для локального моделювання систем керування специфічних видів рухомого складу. Для важкого магістрального вантажного руху, який характеризується тривалою роботою на межі зчеплення, зрив коліс у боксування провокує виникнення фрикційних автоколивань (stick-slip vibrations). У цей момент пружний вал накопичує, а потім різко вивільняє енергію, створюючи руйнівні ударні навантаження в редукторі. З іншого боку, для високошвидкісних пасажирських поїздів двомасова модель необхідна для оцінки динамічних ударів під час екстреного переходу з режиму тяги в режим інтенсивного електродинамічного гальмування або при високочастотному спрацюванні протизносної системи.

Недоліки: Хоча двомасова модель ідеально описує мікродинаміку та автоколивання в передачі, її застосування для симуляції тривалих перегонів перевантажує обчислювальні потужності, оскільки вимагає інтегрування високочастотних коливальних процесів, які глобально не впливають на загальний пройдений шлях чи втрати електроенергії поїзда.

– Одномасова модель застосовується у випадках, коли крутильні коливання у пружних зв'язках практично не впливають на загальне енергоспоживання та макродинаміку руху поїзда.

Доцільність використання: при розрахунках енергоефективності, побудові тягових характеристик та моделюванні загального позовжнього руху поїзда ділянкою.

Переваги: максимальна простота математичного опису, висока швидкість обчислень та мінімальна кількість необхідних параметрів. У цьому випадку всі маси зводяться до еквівалентної маси ротора електродвигуна з моментом інерції J_1 [5, 7].

Недоліки: неможливість дослідження внутрішніх динамічних навантажень у механічній передачі та крутильних коливань.

Оскільки головною метою даного дослідження є оцінка енергоефективності локомотива та загальної динаміки поїзда, де домінуючий вплив мають елементи з найбільшими моментами інерції, розрахункову схему було доцільно оптимізувати до одномасової.

Спираючись на таку оптимізовану одномасову схему, було складено систему диференціальних рівнянь (9), яка розкриває механізм функціонування ТЕП під час

реалізації сили тяги. Для поїзда модель формується як сукупність незалежних тягових модулів.

$$\begin{cases} M_{\text{дв},ij} - M_{\text{окп},ij} = J_{\text{пр},ij} \frac{d\omega_{\text{кп},ij}}{dt} \\ M_{\text{окп},ij} = f(M_{\text{дв},ij}, F_{\text{зчкп},ij}) \end{cases} \quad (9)$$

де $M_{\text{дв},ij}$ – момент двигуна, Нм;

$M_{\text{окп},ij}$ – момент опору прикладеного до колеса колісної пари, Нм;

$J_{\text{пр},ij}$ – приведений момент інерції маси, кг м²;

$\omega_{\text{кп},ij}$ – кутова швидкість колеса колісної пари, рад/с;

$F_{\text{зчкп},ij}$ – сила зчеплення колеса з рейкою, Н.

Друге рівняння із комплексу (9), яке описує характер моменту опору першого та другого колеса, є складною багатовимірною функцією. Перехід колеса у стан боксування ініціюється виникненням надлишкового динамічного моменту в системі, що призводить до появи швидкості проковзування. Більш детально цей специфічний перехідний процес можна формалізувати наступним чином:

$$M_{\text{окп},ij} = \begin{cases} M_{\text{дв},ij}, & \text{якщо } F_{\text{ркп},ij} < F_{\text{зчкп},ij} \\ M_{\text{зчкп},ij}, & \text{якщо } F_{\text{ркп},ij} > F_{\text{зчкп},ij} \end{cases} \quad (10)$$

де $F_{\text{ркп},ij}$ – рушійна сила колеса, Н, що, з урахуванням передавального числа тягового редуктора $\mu_{\text{тр}}$, радіусу колеса $R_{\text{к},ij}$ та ККД передавального механізму $\eta_{\text{тр},ij}$ описується наступним виразом:

$$F_{\text{ркп},ij} = \frac{\mu_{\text{тр},ij} M_{\text{дв},ij} \eta_{\text{тр},ij}}{R_{\text{к},ij}} \quad (11)$$

Запропонований підхід є універсальним і дозволяє врахувати технологічну асиметрію багатодвигунного ТРС (наприклад, різний ступінь зносу бандажів коліс на різних візках), так як рушійна сила розраховується індивідуально для кожного i -го ТЕП.

У сталих режимах руху (за відсутності боксування та юзу) $v_{\text{пр}} = 0$, що природним чином відпрацьовується логікою рівняння (10) без необхідності перебудови математичної моделі.

Враховуючи вищевикладене, для електропоїздів та багатосекційних локомотивів загальна математична модель формується як сукупність N незалежних тягових модулів, які описуються системою (9). Ці модулі є автономними на рівні мікродинаміки (швидкість проковзування $\omega_{\text{пк}}$ у кожного своя), але об'єднані між собою на макrorівні через спільну лінійну швидкість руху поїзда $V_{\text{п}}$.

Використовуючи математичну модель (9), було розроблено структурну схему функціонування ТЕП, яка відображена на рисунку 8.

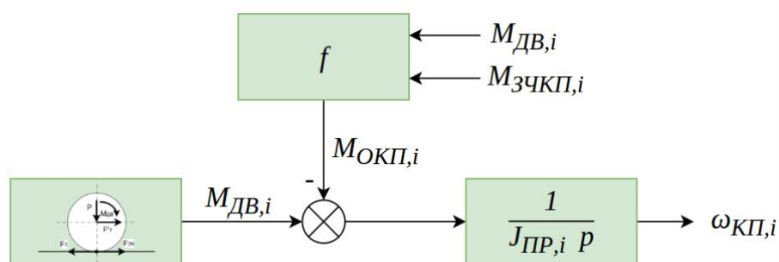


Рис. 8. Структурна схема роботи i -го тягового електроприводу в режимі тяги

Математичний опис процесу утворення гальмівної сили поїзда

Зниження швидкості локомотива забезпечується двома основними підходами: електричним (динамічним) та механічним (пневматичним) гальмуванням. Як правило, електродинамічне гальмування є ефективним на високих та середніх швидкостях [4, 17], тоді як повна зупинка потребує використання фрикційної механічної системи. Це обумовлює необхідність їх комплексного та спільного розгляду.

Під час роботи електричного гальма базова система диференціальних рівнянь (9) залишається незмінною, перехід з тягового в гальмівний режим відбувається лише за рахунок інверсії знака електромагнітного моменту двигуна.

Своєю чергою, робота механічного гальма вимагає глибшого фізичного аналізу. Взаємодія зусиль у системі «колесо-рейка» та фрикційних елементах під час цього процесу продемонстрована на рисунку 9.

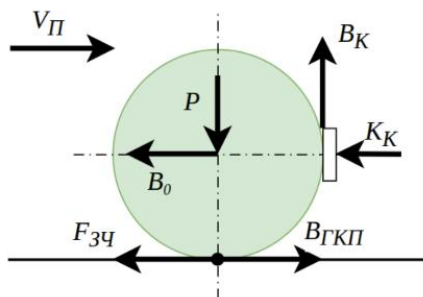


Рис. 9. Процес утворення гальмівної сили поїзда

Згідно з рисунком 9 та третім рівнянням у системі (2), ефективна гальмівна сила $B_{ГКП,ij}$ на одній колісній парі є функцією від сили натиснення колодок $K_{к,ij}$ та їхнього коефіцієнта тертя $\varphi_k(V_{кп,ij})$. Математично це виражається так:

$$B_{ГКП,ij} = 1000\varphi_k(V_{кп,ij})K_{к,ij} \quad (12)$$

де $K_{к,ij}$ – сила притискання гальмівних колодок до колеса (диска), Н.

Коефіцієнт тертя $\varphi_k(V_{кп,ij})$ є нелінійним параметром і розраховується згідно з [18] за емпіричними залежностями відповідно до матеріалу фрикційного елемента:

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

– для стандартних чавунних гальмівних колодок

$$\varphi_k(V_{\text{кп}}) = 0,6 \frac{1,6K+100}{8,0K+100} \cdot \frac{V+100}{5V+100} \quad (13)$$

– для композиційних гальмівних колодок

$$\varphi_k(V_{\text{кп}}) = \begin{cases} 0,44 \cdot \frac{0,1K+20}{0,4K+20} \cdot \frac{V+150}{2V+150}, & \text{якщо } V_{\text{п}} \leq 80 \text{ км/год} \\ 0,44 \cdot \frac{0,1K+1,2}{0,16K+1,2} \cdot \frac{V+67}{1,8V+67}, & \text{якщо } V_{\text{п}} > 80 \text{ км/год} \end{cases} \quad (14)$$

– для накладок дискового гальма

$$\varphi_k(V_{\text{кп}}) = 0,2458 \cdot \frac{0,1K+20}{0,4K+20} \cdot (e^{-0,0225V} + 1) \quad (15)$$

Загальне гальмівне зусилля жорстко лімітується наявним зчепленням коліс з рейками $F_{\text{зч}\Sigma}$. Якщо сумарне механічне зусилля $B_{\text{г}\Sigma}$ або електромагнітна сила електричного гальма перевищує межу зчеплення, створюються передумови для блокування коліс (юз). Цей негативний експлуатаційний режим описується такими обмежувальними рівняннями:

– для механічного гальмування:

$$B = \begin{cases} F_{\text{зч}\Sigma}, & \text{якщо } F_{\text{зч}\Sigma} < B_{\text{г}\Sigma} \\ B_{\text{г}\Sigma}, & \text{якщо } F_{\text{зч}\Sigma} > B_{\text{г}\Sigma} \end{cases} \quad (16)$$

– для електричного гальмування:

$$B = \begin{cases} F_{\text{зч}\Sigma}, & \text{якщо } F_{\text{зч}\Sigma} < F_{\text{дв}\Sigma} \\ F_{\text{дв}\Sigma}, & \text{якщо } F_{\text{зч}\Sigma} > F_{\text{дв}\Sigma} \end{cases} \quad (17)$$

– для електропоїзда

$$B_i = \min(B_{\text{г},i}, F_{\text{зч},i}) \quad (18)$$

Подібно до тягового режиму, розрахункова модель механічної частини для режиму гальмування також може бути деталізована по-різному:

- **Трьомасова модель** є доцільною при проектуванні мікропроцесорних протियозних систем (ABS/WSP), дослідженні асиметричного спрацьовування гальм (наприклад, через різний знос колодок на лівому та правому колесах) та аналізі процесів скручування колісної осі під дією потужних фрикційних сил.

- **Двомасова модель** використовується для оцінки динамічних ударних навантажень у тяговому редукторі, що виникають під час різкого переходу з режиму тяги в режим електричного гальмування, а також при інтенсивному зриві колісної пари в юз.

- **Одномасова модель** є цілком достатньою та найбільш раціональною для розрахунку гальмівних шляхів, оцінки загальних обсягів рекуперованої енергії (що є

критичним для сучасного РС з накопичувачами енергії або системами рекуперації в мережу [19]) та дослідження позовжньої макродинаміки поїзда.

Оскільки в даному дослідженні пріоритетом є оцінка загальних енергетичних показників та динаміки поїзда як єдиного цілого, одномасова розрахункова модель (9), розроблена для тяги, буде абсолютно коректною і для імітації гальмування за умови заміни тягового моменту на відповідний гальмівний.

$$\begin{cases} J_{пр,ij} \frac{d\omega_{кп,ij}}{dt} = -M_{гкп,ij} - M_{окп,ij} \\ M_{окп,ij} = \begin{cases} -M_{гкп,ij}, & \text{якщо } V_{гкп,ij} < F_{зчкп,ij} \\ -M_{зчкп,ij}, & \text{якщо } V_{гкп,ij} > F_{зчкп,ij} \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

де $M_{гкп,ij}$ – гальмівний момент колеса, який можна отримати з урахуванням передавального числа тягового редуктора $\mu_{тр}$ та діаметра колеса R_k .

Спираючись на математичний апарат (19), було синтезовано структурну схему роботи механічної підсистеми у гальмівному режимі, яка проілюстрована на рисунку 10.

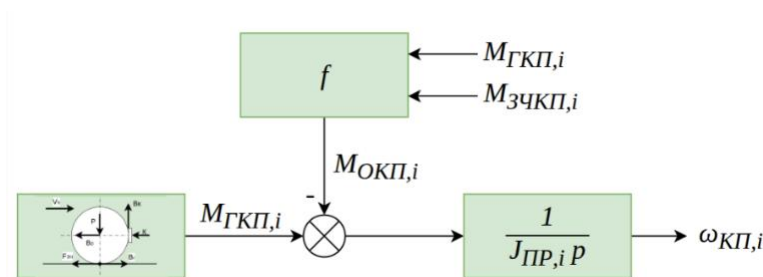


Рис. 10. Структурна схема роботи механічної частини осей режимів гальмування

Аналогічно до режиму тяги, загальна гальмівна сила поїзда B з розподіленою гальмівною системою (як електродинамічною, так і пневматичною) формується шляхом суперпозиції гальмівних зусиль усіх активних осей. Це дозволяє моделювати складні алгоритми WSP (Wheel Slide Protection – протизюзний захист), де гальмівний тиск або рекуперативний момент скидається індивідуально на осі, що заблокувалася:

$$B_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k B_{ij} \quad (20)$$

Комплексне математичне моделювання руху поїзда

Запропонована система рівнянь (9) дають змогу глибоко формалізувати фізичні явища в ТЕП та зоні контакту коліс із рейками. Це відкриває можливість для комплексного аналізу динаміки всього поїзда в цілому з урахуванням усіх робочих режимів.

Окрім тягових F_t та гальмівних B зусиль, рівняння (1) містить силу опору W , яка може набувати як додатних, так і від’ємних значень. На її величину впливає уза-

гальнений коефіцієнт k_w , який інтегрує в собі аеродинаміку, тип вагонів, криві ділянки колії, ухили профілю та погодні фактори [18]. Через велику варіативність цих показників створити єдину універсальну математичну модель опору для всіх типів екіпажів майже неможливо. Тому для забезпечення високої адекватності моделі при збереженні оптимального часу обчислень, значення k_w слід адаптувати під конкретний тип локомотива і специфіку вибраного перегону. Наприклад, для високошвидкісних поїздів домінуючою складовою у силі W буде аеродинамічний опір, тоді як для важкого вантажного руху визначальними стануть загальна маса та опір від ухилів профілю. Наша математична модель дозволяє легко змінювати ці макропараметри без перебудови самої базової структури диференціальних рівнянь.

Шляхом інтеграції моделей тяги та гальмування у базове диференціальне рівняння поступального руху, формується повна математична модель поїзда, здатна достовірно відтворювати нестационарні процеси.

Для комплексного опису багатодвигунного РС (зокрема МВРС) найбільш доцільно застосувати трирівневу архітектуру математичної моделі. Такий підхід дозволяє чітко розмежувати процеси мікродинаміки в контакті та макродинаміки руху:

1. Рівень осі (мікродинаміка). На цьому рівні розраховується баланс моментів для кожного індивідуального ТЕП (або гальмівного механізму) з урахуванням локального зчеплення та можливого проковзування:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{кп,ij} = V_{п} + v_{пр,ij} \\ F_{зчкп,ij} = m_{о,ij} g \varphi_{зч,ij}(v_{пр,ij}) \\ M_{зчкп,ij} = F_{зчкп,ij} \frac{R_{к,ij}}{\mu_{тр,ij} \eta_{тр,ij}} \\ F_{ркп,ij} = \frac{\mu_{тр,ij} M_{дв,ij} \eta_{тр,ij}}{R_{к,ij}} \\ B_{гкп,ij} = 1000 \varphi_k(V_{кп,ij}) K_{к,ij} \\ M_{гкп,ij} = B_{гкп,ij} \frac{R_{к,ij}}{\mu_{тр,ij} \eta_{тр,ij}} \\ -M_{гкп,ij} \pm M_{дв,ij} - M_{окп,ij} = J_{пр,ij} \frac{d\omega_{пк,ij}}{dt} \\ v_{пр,ij} = \omega_{пк,ij} \frac{R_{к,ij}}{\mu_{тр,ij}} \\ F_{т,ij} = \min(F_{ркп,ij}, F_{зчкп,ij}) \\ B_{ij} = \min(B_{гкп,ij} + F_{дв,ij}, F_{зчкп,ij}) \end{array} \right. \quad (21)$$

Значення $M_{окп,ij}$ визначається за системою рівнянь (10) за умови, що момент двигуна є ненульовим, а також за системою рівнянь (19) у випадку, коли гальмівний момент колісної пари відмінний від нуля.

2. Рівень секції або візка (сумація). Локальні зусилля від окремих осей інтегруються для визначення загального тягового $F_{т,i}$ або гальмівного зусилля, яке генерує конкретна секція чи моторний візок i :

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{т,i} = \sum_{j=1}^k F_{т,ij} \\ B_i = \sum_{j=1}^k B_{ij} \\ W = f(V_{п}, k_w) \end{array} \right. \quad (22)$$

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

3. Рівень поїзда (макродинаміка). Визначається загальне прискорення та траєкторія руху поїзда як єдиної макросистеми під дією сумарних тягових, гальмівних сил та сили опору руху:

$$\begin{cases} F_{T\Sigma} = \sum_{i=1}^N F_{T,i} \\ B_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N B_i \\ W_{\Sigma} = f(V_n, k_W) \\ F_{T\Sigma} - B_{\Sigma} - W_{\Sigma} = m_n \frac{dV_n}{dt} \end{cases} \quad (23)$$

З використанням розробленої комплексної системи рівнянь (21, 22, 23) було побудовано фінальну структурну схему моделі роботи механічної частини локомотива під час його руху ділянкою, що наведена на рисунку 11.

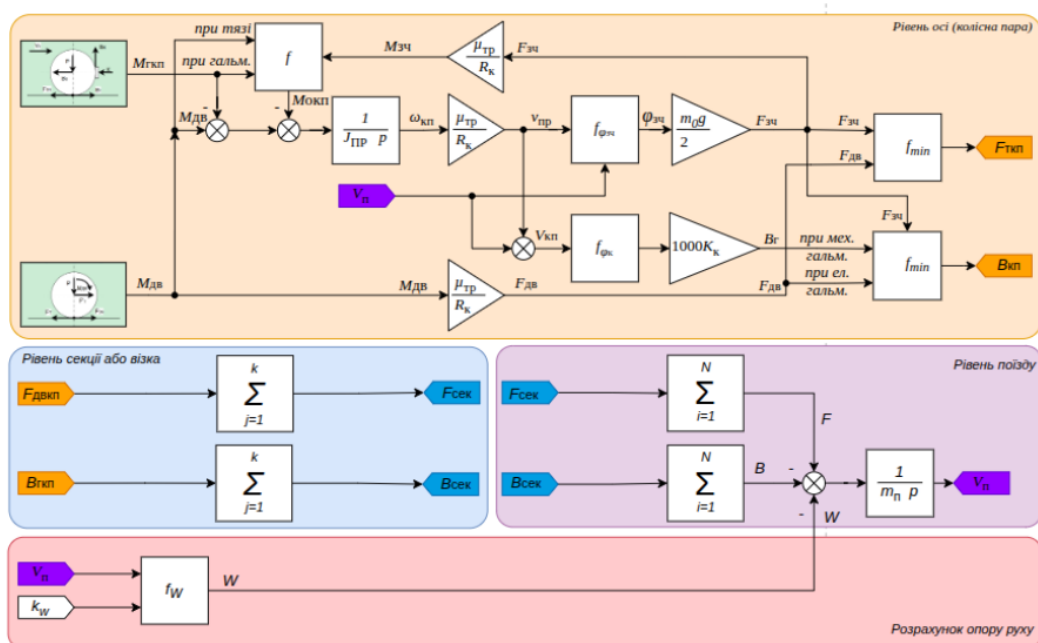


Рис. 11. Структурна схема роботи механічної частини локомотива при його русі

Запропонований ієрархічний підхід до моделювання механічної частини багатодвигунного ТРС забезпечує необхідний компроміс між обчислювальною складністю та фізичною достовірністю результатів. Завдяки декомпозиції системи на рівні окремих осей та подальшій агрегації зусиль на макорівні, модель стає ефективним інструментом для оцінки переваг розподіленої тяги в сучасних електропоїздах та багатосекційних локомотивах. Це створює надійне методичне підґрунтя для цифрового моделювання «життєвого циклу» тягових процесів, що є критично важливим

для оптимізації графіків руху та розробки інтелектуальних алгоритмів енергозбереження в системах автоводіння.

Висновки.

У роботі вирішено актуальну науково-прикладну проблему підвищення точності математичного моделювання макродинаміки тягового рухомого складу шляхом розробки узагальненої моделі, що інтегрує процеси в ТЕП та зоні нестационарного фрикційного контакту. За результатами дослідження сформульовано такі висновки:

1. Обґрунтовано необхідність комплексного підходу до моделювання макродинаміки поїзда, який, на відміну від класичних методів, базується на врахуванні взаємозв'язку між швидкістю руху та швидкістю проковзування колісних пар. Це дозволило відійти від спрощених емпіричних залежностей коефіцієнта зчеплення і перейти до динамічного опису переходів між станами «зчеплення–ковзання» (боксування, юз) у єдиному розрахунковому контурі.

2. Розроблено трирівневу ієрархічну архітектуру моделювання (вісь – секція – поїзд), яка забезпечує високу достовірність відтворення тягових і гальмівних характеристик для різних типів РС. Наукова новизна полягає у представленні коефіцієнта тертя у вигляді 3D-поверхні, що залежить одночасно від лінійної швидкості та швидкості ковзання, що дозволяє адекватно імітувати роботу сучасних мікропроцесорних систем керування тягою та протизюзним захистом (WSP).

3. Доведено доцільність застосування оптимізованої одномасової розрахункової схеми механічної частини ТЕП для задач макродинаміки. Встановлено, що для розрахунку енергоефективності, гальмівних шляхів та поздовжнього руху поїзда ділянкою така модель забезпечує необхідну точність (з похибкою, що не перевищує припустимі межі для тягових розрахунків) при суттєвому зниженні обчислювальних витрат порівняно з багатомасовими схемами.

4. Формалізовано математичний опис розподіленої тяги для багатодвигунного РС, що дозволяє враховувати технологічну асиметрію (різний знос бандажів, нерівномірне осьове навантаження) та локальні зовнішні збурення на рейках. Це створює надійний інструментарій для проектування інтелектуальних систем керування, спрямованих на максимізацію використання сили зчеплення та зниження питомих витрат енергії.

5. Запропонована модель є універсальною і легко масштабується для моделювання руху як важковагових вантажних поїздів, так і високошвидкісного моторвагонного рухомого складу, що підтверджується можливістю адаптації параметрів аеродинамічного опору та характеристик гальмівного обладнання.

Повідомлення

Стаття підготовлена при виконанні науково-дослідної роботи «Енергетичний менеджмент у plug-in гібридних тягових системах рейкового рухомого складу, обладнаного багатодвигунним тяговим електроприводом» (№ Д/Р 0125U001619), що фінансується МОН України.

ЛІТЕРАТУРА

1. Goolak S., Sapronova S., Tkachenko V., Riabov Ie., Overianova L., Yeritsyan B. Mathematical model of mechanical subsystem of traction electric drive of an electric locomotive. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2021. Вип. 197. С. 119–129. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-12>
2. Ноженко В. С. Поліпшення триботехнічних характеристик двоточкового контакту «колесо-рейка» активацією поверхонь : дис. канд. техн. наук : 05.22.07. Сєверодонецьк, 2016. 152 с.

3. Барибін М. А., Фалендиш А. П., Клецька О. В., Іванченко Д. А., Кіріцева О. В. Удосконалення тягових розрахунків та режимів ведення тягового рухомого складу. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. Вип. 5 (95). С. 71–83. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/253550>
4. Болжеларський Я. В., Довганюк С. С. Гальмування маневрового состава при низьких значеннях коефіцієнта зчеплення коліс з рейками. *Залізничний транспорт України*. 2010. № 5. С. 39–43.
5. Бобирь Д. В., Капіца М. І., Сердюк В. Н. Теорія локомотивної тяги. Тягові розрахунки для промислового залізничного транспорту : навч. посіб. Дніпро : УДУНТ, 2022. 113 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://e-book.ust.edu.ua/catalog/view/316/487/3566>
6. Antolin P., Nguyen K., Goicolea J. M. A General and Robust 3D Finite Element Dynamics Framework for Railway Vehicle-Bridge Interaction with Nonlinear Wheel-Rail Contact Modeling. 2026. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2603.06196>
7. Любарський Б. Г., Рябов Є. С., Глебова Т. В., Глебова М. Л. Математична модель тягового приводу на базі двигуна з поперечним полем (переклад р. м.). *Комунальне господарство міст. Серія : Технічні науки та архітектура*. Харків : ХНУМГ, 2008. Вип. 81. С. 283–288. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/4caabe1b-4297-49ef-abd2-f6dde543fc16>
8. Goolak S., Liubarskyi B., Riabov I., Chepurna N., Pohosov O. Simulation of a direct torque control system in the presence of winding asymmetry in induction motor. *Engineering Research Express*. 2023. Vol. 5. No. 2. 025070. DOI: <https://doi.org/10.1088/2631-8695/acde46>
9. Goolak S., Liubarskyi B. Vector Control System Taking into Account the Saturation of an Induction Motor. *Tekhnicheskij vjesnik*, 2024. Vol. 31. No. 4. P. 1170–1178. DOI: <https://doi.org/10.17559/TV-20221015124239>
10. Тартаковський Е. Д., Агулов А. Ф., Фалендиш А. П. Теорія та конструкція локомотивів. Ч. 2. Вибір та розрахунок основних вузлів локомотивів : навч. посіб. Харків : УкрДАЗТ, 2009. 150 с.
11. Петруковець М. І., Свириденюк А. І. Механіка дискретного фрикційного контакту. (переклад р. м.). Мінськ: Наука і техніка, 1990. 271 с.
12. Riabov I., Overianova L., Iakunin D., Neshcheret V., Ivanov, K. Equipping suburban diesel–electric multiple unit with a hybrid power unit. e-Prime – Advances in Electrical Engineering, *Electronics and Energy*. 2025. Vol. 11. 100949. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.100949>
13. Мямлін С. С. Удосконалення конструкцій рухомого складу вузької колії: дис. канд. техн. наук: 05.22.07. Харків, 2021. 57 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/7314/1/dis_Myamlin.pdf
14. Zhang Y., Zhu W., Wang H., Tian C., Zhou J. Online estimation method of train wheel–rail adhesion coefficient based on parameter estimation. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*. 2025. Vol. 144, no. 3, P. 2873–2891. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmescs.2025.068951>
15. Ігнатов Г. С., Сулим А. О., Распопін В. Р., Хозя П. О. Коефіцієнт зчеплення двосистемного електропоїзда міжрегіонального сполучення виробництва ПАТ «КВБЗ» (переклад р. м.). *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*. 2013. Вип. 8. С. 25–33.
16. Рябов Є. С., Овер'янова Л. В., Якунін Д. І. Білоконь І. М., Гулак С. О. Застосування маневрових електровозів для передатної та вивізної роботи. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія: Транспортні системи і технології*. 2022. Вип. 40. С. 47–62. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-5>
17. Gan W, Zhao X, Wei D, Bai Z, Ding R, Liu K, Li X. Research on the Identification of Nonlinear Wheel–Rail Adhesion Characteristics Model Parameters in Electric Traction System Based on the Improved TLBO Algorithm. *Electronics*. 2024. Vol. 13. No. 9. 1789. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics13091789>
18. Правила тягових розрахунків для поїзної роботи (переклад р. м.). Москва : Транспорт, 1985. 287 с.
19. Riabov I., Goolak S., Neduzha L. An Estimation of the Energy Savings of a Mainline Diesel Locomotive Equipped with an Energy Storage Device. *Vehicles*. 2024. 6(2), 611–631. DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles6020028>

A. S. Maslii

Ukrainian State University of Railway Transport
Feirbakha Sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine
Tel: +380974137970, E-mail: maslij@kart.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0554-8150>

V. A. Gevrasov

Ukrainian State University of Railway Transport
Feiirbakha Sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine
Tel: +380932563660, E-mail: gevrasov_phd@kart.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8910-5172>

R. M. Antonenko

Ukrainian State University of Railway Transport
Feiirbakha Sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine
Tel: +380632257218, E-mail: antonenko_phd@kart.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9241-5857>

I. V. Iakubovskyi

Ukrainian State University of Railway Transport
Feiirbakha Sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine
Tel: +380974460052, E-mail: 1i1i@i.ua
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7833-6604>

**MATHEMATICAL MODELING OF MACRODYNAMICS OF RAIL
ROLLING STOCK WITH MULTI-MOTOR TRACTION
ELECTRIC DRIVE**

This study presents a generalized mathematical model of train movement to accurately simulate non-stationary processes within the traction electric drive and the wheel-rail frictional contact zone during traction and braking.

The model employs an integrated three-level architecture: single-axle microdynamics, bogie-level force summation, and overall train macrodynamics. Furthermore, the paper justifies the feasibility of using an optimized single-mass computational scheme for the mechanical part of the traction electric drive, which is particularly effective for evaluating energy efficiency, calculating braking distances, and simulating general train movement along a track section.

A novel system of differential equations integrates traction, braking, and motion resistance. Crucially, frictional interaction is refined by defining the adhesion coefficient as a 3D nonlinear function of both linear velocity and wheelset slip. This allows for precise reproduction of adhesion loss (spin and slide) and friction transitions.

The framework's scalability ensures adaptability across various train types, providing a robust foundation for optimizing microprocessor-based traction and anti-skid control systems.

Keywords: mathematical modeling, multi-motortraction rolling stock, traction electric drive, wheel-railcontact, adhesion coefficient, slipvelocity.

REFERENCES

1. Goolak, S., Sapronova, S., Tkachenko, V., Riabov, Ie., Overianova, L., & Yeritsyan, B. (2021). Mathematical model of mechanical subsystem of traction electric drive of an electric locomotive. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDUZT*, (197), 119–129. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-12>

2. Nozhenko, V. S. (2016). *Polipshennia trybotekhnichnykh kharakterystyk dvotochkovoho kontaktu «koleso-reika» aktyvatsiieiu poverkhon* (Candidate dissertation). Sievierodonetsk.
3. Barybin, M. A., Falendysh, A. P., Kletska, O. V., Ivanchenko, D. A., & Kiritseva, O. V. (2021). Udoshkonalennia tiahovykh rozrakhunkiv ta rezhymiv vedenniatia hovoho rukhomoho skladu. [Improvement of Traction Calculations and Driving Modes of Traction Rolling Stock]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, (5), 71–83. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/253550>
4. Bolzhelarskyi, Ya. V., & Dovhaniuk, S. S. (2010). Halmuvannia manevrovoho sostava pry nyzkykh znachenniakh koefitsiienta zcheplennia kolis z reikamy. [Braking of shunting trains at lower values of wheel-rail adhesion coefficient]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway transport of Ukraine*, 5, 39–43.
5. Bobyr, D. V., Kapitsa, M. I., & Serdiuk, V. N. (2022). Teoriia lokomotyvnoi tiahvy. Tiahovi rozrakhunky dlia promyslovoho zaliznychnoho transportu [Theory of locomotive traction. Traction calculations for industrial railway transport]. *UDUNT*, 113. Retrieved from: <https://e-book.ust.edu.ua/catalog/view/316/487/3566>
6. Antolin, P., Nguyen, K., & Goicolea, J. M. (2026). A General and Robust 3D Finite Element Dynamics Framework for Railway Vehicle-Bridge Interaction with Nonlinear Wheel-Rail Contact Modeling *arXiv*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2603.06196>
7. Lyubarskiy, B. G., Riabov, E. S., Hlebova, T. V., & Hlebova, M. L. (2008). Matematicheskaya model tyagovogo privoda na bazi dviguna z poperechnim polem. [Mathematical model of a traction drive based on a transverse field motor] *Komunalne hospodarstvo mist – Municipal economy of the city*, 81, 283–288. Retrieved from: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/4caabe1b-4297-49ef-abd2-f6dde543fc16>
8. Goolak, S., Liubarskiy, B., Riabov, I., Chepurna, N., & Pohosov, O. (2023). Simulation of a direct torque control system in the presence of winding asymmetry in induction motor. *Engineering Research Express*, 5, 025070. DOI: <https://doi.org/10.1088/2631-8695/acde46>
9. Goolak, S., & Liubarskiy, B. (2024). Vector Control System Taking into Account the Saturation of an Induction Motor. *Tekhnichi vjesnik*, 31 (4), 1170–1178. DOI: <https://doi.org/10.17559/TV-20221015124239>
10. Tartakovskyi, E. D., Ahulov, A. F., & Falendysh, A. P. (2009). Teoriia ta konstrukttsiia lokomotyviv. Vybir ta rozrakhunok osnovnykh vuzliv lokomotyviv. [Theory and design of locomotives. Selection and calculation of the main nodes of locomotives]. *UkrDAZT*. 151.
11. Petrukovets, M. I., & Sviridenyuk, A. I. (1990). Mekhanika diskretnogo friksionnogo kontakta. [Mechanics of discrete friction contact]. *Nauka i tekhnika*. 271.
12. Riabov, I., Overianova, L., Iakunin, D., Neshcheret, V., & Ivanov, K. (2025). Equipping suburban diesel–electric multiple unit with a hybrid power unit *e-Prime*, 11, 100949. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.100949>
13. Miamlin, S. S. (2021). *Udoskonalennia konstrukttsii rukhomoho skladu vuzkoi kolii* (Candidate dissertation). Kharkiv. Retrieved from: http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/7314/1/dis_Myamlin.pdf
14. Zhang, Y., Zhu, W., Wang, H., Tian, C., & Zhou, J. (2025). Online Estimation Method of Train Wheel-Rail Adhesion Coefficient Based on Parameter Estimation. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 144 (3), 2873–2891. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmes.2025.068951>
15. Ihnatov, H. S., Sulym, A. O., Raspopin, V. R., & Khozia, P. O. (2013). Koefitsiient zcheplennia dvosystemnoho elektrovozda mizhrehionalnoho spoluchennia vyrobnytstva PAT «KVBZ». [Coupling coefficient of a dual-system electric train for interregional connections manufactured by PJSC «KVBZ»]. *Zbirnyk naukovykh prats «Reikovy rukhomyi sklad» – Collection of scientific papers 'Railbound Rolling Stock'*, 8, 25–33.
16. Riabov, Ye. S., Overianova, L. V., Yakunin, D. I., Bilokon I. M., & Hulak S. O. (2022). Zastosuvannia manevrovvykh elektrovoziv dlia peredatnoi ta vyviznoi roboty [Application of maneuvering electric locomotives for transfer and freight work]. *Transportni systemy i tekhnolohii – Transport systems and technologies*, 40, 47–62. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-5>
17. Gan W, Zhao X, Wei D, Bai Z, Ding R, Liu K, Li X. (2024). Research on the Identification of Nonlinear Wheel–Rail Adhesion Characteristics Model Parameters in Electric Traction System Based on the Improved TLBO Algorithm. *Electronics*, 13 (9), 1789. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics13091789>
18. Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty. [Rules for traction calculations for train operation]. (1985). *Transport*. 287.
19. Riabov, I., Goolak, S., & Neduzha, L. (2024). An Estimation of the Energy Savings of a Mainline Diesel Locomotive Equipped with an Energy Storage Device. *Vehicles*, 6 (2), 611–631. DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles6020028>



Стаття надійшла 08.04.2026
Стаття прийнята 16.04.2026
Опубліковано 29.05.2026

Д. А. Іванченко

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

м. Дніпро, вул. Гоголя, 29, 49044, Україна

Тел.: +380963681237, E-mail: ivanchenko_d_a@pstu.edu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3024-3930>

А. М. Фоміна

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

м. Дніпро, вул. Гоголя, 29, 49044, Україна

Тел.: +380679354461, E-mail: fomina_a_n@pstu.edu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9810-8997>

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ МОДЕРНІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТА АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

Сучасний стан глобальної економіки, зростання міжнародної торгівлі та євроінтеграційні процеси в Україні вимагають докорінного перегляду підходів до організації мультимодальних перевезень. Несинхронізованість роботи залізничного та автомобільного транспорту, відсутність єдиного методологічного базису, фрагментарність обміну даними та застарілі принципи роботи терміналів призводять до значних простойв рухомого складу, невиправданих фінансових втрат і стримують транзитний потенціал країни. Крім того, екологічний вектор розвитку Європейського Союзу диктує вимоги щодо переорієнтації вантажопотоків на більш енергоефективну залізницю, що неможливо без тісної технологічної інтеграції з автотранспортом. Аналіз останніх досліджень показав, що, незважаючи на значний інтерес науковців до окремих технічних та економічних аспектів (оптимізація графіків, екологічні обмеження, поведінкові фактори), комплексні методологічні основи модернізації технологічної взаємодії цих видів транспорту залишаються недостатньо розробленими. У науковій літературі відсутній єдиний концептуальний підхід до формування динамічних моделей інтегрованих процесів на перевантажувальних вузлах, що створює теоретичний вакуум.

Метою статті є розробка та наукове обґрунтування методологічних основ модернізації технологічної взаємодії залізничного та автомобільного транспорту для підвищення ефективності мультимодальних перевезень. Дослідження спрямоване на створення моделей та алгоритмів безшовної інтеграції логістичних процесів на стику різних транспортних систем, забезпечення мінімізації сукупних витрат та підвищення пропускної здатності транспортних вузлів.

© Іванченко Д. А., Фоміна А. М., 2026

У статті запропоновано класифікацію методів модернізації, яка охоплює п'ять груп: технічні (конвеєрні системи, роботизовані крани, крос-докінг), організаційні (синхронізація «just-in-time», спільні центри прийняття рішень), цифрові (штучний інтелект для прогнозування черг, IoT-датчики), економічні (стимулювання позапикового використання терміналів) та екологічні (зменшення вуглецевого сліду через оптимізацію маршрутів). Розроблено математичні моделі, зокрема коефіцієнт технологічної синхронізації, який відображає ступінь збігу вікон готовності залізничного та автомобільного сегментів, а також формулу для визначення оптимальної кількості постів навантаження. Використання єдиної цифрової накладної скорочує час документального оформлення на 30%. Впровадження системи дозволяє автоматично генерувати перепустки для водіїв, коригувати графік виїзду фур залежно від реального місцеперебування поїзда та забезпечувати «зелений коридор» для швидкопсувних товарів.

Ключові слова: залізничний транспорт, автомобільний транспорт, взаємодія з інфраструктурою, мультимодальні перевезення.

Вступ. Сучасний стан глобальної економіки вимагає докорінного перегляду підходів до організації мультимодальних перевезень. Стрімкий розвиток та проблеми міжнародної торгівлі створює додаткове навантаження на наявну транспортну інфраструктуру, що потребує впровадження інноваційних рішень.

Залізничний та автомобільний транспорт традиційно розглядаються як окремі сегменти, проте їхня ефективність максимально розкривається лише за умови тісної технологічної інтеграції. Модернізація взаємодії між цими видами транспорту є ключовим чинником зниження собівартості логістичних операцій. Використання застарілих методологічних підходів до стикування графіків руху та обробки вантажів стримує розвиток транзитного потенціалу країни.

Актуальність теми зумовлена необхідністю створення єдиного інформаційного та технологічного простору для всіх учасників перевізного процесу. Впровадження цифрових технологій та інтелектуальних систем управління дозволяє мінімізувати простой на стикових пунктах.

Екологічний вектор розвитку Європейського Союзу диктує вимоги щодо переорієнтації вантажопотоків на більш енергоефективну залізницю в поєднанні з гнучкістю автомобільного транспорту. В умовах дефіциту енергоресурсів оптимізація маршрутів стає критично важливою для виживання транспортних компаній. Створення нових методологічних основ дозволить розв'язати проблему «останньої милі» з максимальною економічною вигодою.

Існуюча нормативна база часто не враховує динамічні зміни в технічному оснащенні перевантажувальних терміналів. Наукове обґрунтування модернізації взаємодії сприяє підвищенню безпеки руху та надійності доставки вантажів.

Дослідження відповідає стратегічним напрямкам розвитку національної транспортної системи в контексті євроінтеграції. Забезпечення безперебійного функціонування транспортних коридорів неможливе без узгодженої роботи різних видів транспорту на методологічному рівні.

Аналіз останніх досліджень.

У публікації [1] запропоновано нову 0–1 нелінійну модель проектування інтермодальних мереж «залізниця–автомобіль», що враховує політику скорочення викидів. Дослідження підкреслює важливість інтеграції екологічних критеріїв у методо-

логію модернізації транспортної взаємодії. Отримані результати демонструють можливість оптимізації структури мережі з урахуванням вартості та вуглецевих обмежень. Сказане формує основу для розробки сталих технологій взаємодії різних видів транспорту.

У роботі [2] розроблено двоетапну стохастичну модель для інтермодальних перевезень в умовах невизначеності попиту та пропускної спроможності. Автори враховують ризики та варіативність параметрів, що є ключовим для реальних транспортних систем. Запропонований підхід дозволяє підвищити надійність планування перевезень.

Автори [3] формують практико-орієнтований науковий порядок денний для розвитку комбінованих перевезень у Європі. У роботі систематизовано бар'єри та драйвери інтеграції залізничного і автомобільного транспорту. Автори наголошують на необхідності гармонізації інфраструктури та цифрових рішень. Це визначає стратегічні напрями модернізації інтермодальних систем.

У роботі [4] досліджують поведінкові аспекти вибору інтермодальних перевезень з урахуванням ставлення користувачів. Модель включає психологічні фактори, що впливають на прийняття рішень. Результати показують, що ефективність інтеграції транспорту залежить не лише від технічних, а й соціальних чинників. Це розширює методологію модернізації за рахунок урахування людського фактору.

Автори [5] аналізують сценарії переходу міських вантажних перевезень на залізничний транспорт. Дослідження демонструє потенціал зниження навантаження на міські дороги. Запропоновані моделі враховують логістичні та інфраструктурні обмеження. Результати сприяють формуванню ефективних стратегій інтеграції міських транспортних систем.

Дослідники [6] розглядають задачу маршрутизації з урахуванням нечітких параметрів та часових вікон. У моделі інтегровано фактори невизначеності та часової залежності. Це дозволяє підвищити точність планування інтермодальних перевезень. Робота робить внесок у розвиток адаптивних методів управління транспортними системами.

Науковці [7] проводять порівняльний аналіз розвитку інтермодальних перевезень у країнах Європи та Україні. Визначено ключові тенденції та проблеми інтеграції транспортних систем. Автори акцентують увагу на необхідності інституційних реформ та інвестицій, що створює підґрунтя для адаптації європейського досвіду в Україні.

В роботі [8] пропонують «зелену» модель маршрутизації з урахуванням часу відправлення автомобільного транспорту. Дослідження інтегрує екологічні критерії та невизначеність у процес планування. Отримані результати демонструють зниження викидів при збереженні ефективності перевезень.

Автори [9] досліджують екологічність експлуатації морських бурових суден у чутливих регіонах. Робота не прямо стосується інтермодальних перевезень, вона підкреслює значення екологічних стандартів у транспорті. Отримані підходи можуть бути адаптовані для оцінки екологічності логістичних систем.

В роботі [10] розробляють високонадійну систему передачі даних для безпілотних транспортних засобів. Дослідження акцентує увагу на стійкості до перешкод і надійності зв'язку. Це є важливим для цифровізації інтермодальних перевезень. Отримані результати можуть бути використані для інтеграції автономних технологій у транспортні системи.

В статті [11] досліджують удосконалення технології пасажирських інтермодальних перевезень у контексті розвитку туризму. Автори пропонують підходи до узгодження графіків і підвищення якості обслуговування. Визначено роль залізничного транспорту як базового елементу інтеграції.

В роботі [12] аналізують п'ятипараметричну логістичну функцію та її порівняння з чотирипараметричною. Хоча дослідження має біохімічний характер, математичний апарат може застосовуватись у транспортному моделюванні. Це дозволяє розширити інструментарій аналізу складних систем.

Автори [13] розглядають оптимізацію розкладу руху швидкісних поїздів із використанням гібридного моделювання. Запропонований підхід дозволяє підвищити ефективність використання інфраструктури. Це важливо для синхронізації інтермодальних перевезень. Робота формує основу для інтеграції розкладів різних видів транспорту.

В статті [14] досліджують вплив перевантаженості транспорту на готовність пасажирів платити. Отримані результати мають значення для оцінки якості транспортних послуг, що важливо при плануванні інтегрованих перевезень.

В дослідженні [15] оцінюють взаємодію авіаційного та залізничного транспорту в інтермодальних системах. Дослідження визначає умови ефективного управління транспортними потоками. Автори аналізують вплив координації на якість перевезень.

Проведений аналіз сучасних наукових публікацій та нормативно-технічної документації дозволив встановити значний інтерес дослідників до окремих аспектів функціонування залізничної та автомобільної галузей. Проте більшість праць фокусується на суто технічних параметрах рухомого складу або на економічній ефективності окремих підприємств без належного врахування їхньої синергії.

Системний огляд джерел засвідчив, що методологічні основи модернізації технологічної взаємодії залізничного та автомобільного транспорту досі не отримали достатньої уваги та комплексного висвітлення. У науковій літературі відсутній єдиний концептуальний підхід до формування динамічних моделей інтегрованих процесів на перевантажувальних вузлах. Таким чином, виявлений теоретичний вакуум підтверджує необхідність розробки нових методичних положень для усунення технологічних розривів у транспортних ланцюгах.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети використано комплекс загальнонаукових та спеціальних методів дослідження. Системний підхід застосовано для розгляду залізничного та автомобільного транспорту як елементів єдиної інтегрованої системи. Методи статистичного аналізу використані для обробки даних та виявлення закономірностей у простоях транспорту. Математичне моделювання дозволило формалізувати процеси взаємодії та оцінити вплив різних параметрів на загальну продуктивність. Порівняльний аналіз дозволив оцінити переваги запропонованих рішень відносно існуючих технологічних схем.

Об'єкт та предмет дослідження. Об'єктом дослідження є процеси технологічної взаємодії залізничного та автомобільного транспорту в системі мультимодальних перевезень. Предметом дослідження є методологічні підходи, моделі та алгоритми модернізації спільної роботи цих видів транспорту на перевантажувальних терміналах. Робота базується на аналізі параметрів рухомого складу та логістичних операцій у вузлах перетину транспортних мереж.

Постановка проблеми. Транспортна система України на сучасному етапі стикається з серйозними викликами, спричиненими несинхронізованістю роботи залізничного та автомобільного секторів. Основна проблема полягає у відсутності єди-

ного методологічного базису для оперативного управління змішаними перевезеннями в реальному часі. Існуючі технологічні процеси терміналів часто побудовані на застарілих принципах, що призводить до тривалих простоїв рухомого складу та невиправданих фінансових втрат.

Відсутність чіткої координації між залізницею та автотранспортом створює «вузькі місця» в міжнародних транспортних коридорах. Процеси обміну даними між перевізниками різних видів транспорту залишаються фрагментарними та часто не автоматизованими. Це унеможливорює точне прогнозування часу прибуття вантажів та оптимізацію роботи складських комплексів.

Потреба в модернізації зумовлена також невідповідністю технічного стану перевантажувальних пунктів сучасним вимогам інтенсивності вантажопотоків. Недостатня теоретична розробленість питань взаємодії не дозволяє повною мірою впроваджувати цифрові двійники транспортних процесів.

Проблема посилюється складністю врахування випадкових факторів, що впливають на роботу автомобільного транспорту в дорозі. Вирішення цих суперечностей вимагає формування цілісної наукової концепції модернізації технологічної взаємодії. Саме тому пошук нових методологічних підходів є критично важливим для підвищення конкурентоспроможності всієї транспортної мережі.

Мета статті. Метою роботи є розробка та наукове обґрунтування методологічних основ модернізації технологічної взаємодії залізничного та автомобільного транспорту для підвищення ефективності мультимодальних перевезень. Дослідження спрямоване на створення моделей та алгоритмів, що забезпечують безшовну інтеграцію логістичних процесів на стику різних транспортних систем. Кінцевим результатом є підвищення пропускної здатності транспортних вузлів та мінімізація сукупних витрат на доставку вантажів.

Виклад основного матеріалу. Сучасний розвиток транспортних систем потребує переходу від конкуренції між окремими видами транспорту до їхньої збалансованої взаємодії. Модернізація технологічної взаємодії залізничного та автомобільного транспорту стає одним із ключових факторів підвищення ефективності логістики та досягнення цілей сталого розвитку.

Методологічні основи цього процесу базуються на комплексному підході, який об'єднує системний аналіз, економіко-математичне моделювання та методи багатокритеріальної оптимізації. Сучасні дослідження в цій галузі пропонують інтеграцію технічних, економічних та екологічних змінних у єдину модель для стратегічного планування. Такий підхід дозволяє оцінювати ефективність взаємодії не лише за вартісними показниками, але й з урахуванням впливу на навколишнє середовище та соціальні аспекти.

Інфраструктурна складова модернізації. Ключовим елементом технологічної взаємодії є облаштування місць перетину транспортних потоків. Модернізація залізничних переїздів з впровадженням інноваційних технологій безпеки є важливим кроком для організації високошвидкісного руху поїздів. Повне усунення ризиків можливе лише при закритті переїздів або переході на дворівневі розв'язки, однак з огляду на фінансові обмеження та зручність для користувачів, необхідним є поетапне впровадження сучасних систем безпеки.

Методологія оцінки та оптимізації. Для обґрунтування управлінських рішень щодо розвитку взаємодії різних видів транспорту застосовується широкий спектр методів. Серед них особливе місце займають: метод аналізу ієрархій – дозволяє визначити вагомість різних критеріїв на основі експертних оцінок. Наприклад, у дос-

лідженнях щодо інтеграції залізничних систем різної колії, найвищої ваги набувають критерії військової мобільності (0,204), розвитку інфраструктури (0,186) та економічних умов (0,164).

Гібридні оптимізаційні моделі – використовуються для проєктування сталих інтермодальних вантажних перевезень в умовах невизначеності. Такі моделі можуть забезпечити зменшення максимального ризику на 24% при незначному збільшенні очікуваних витрат (лише на 1,4%).

SWOT-аналіз – допомагає визначити стратегії для покращення існуючих коридорів та залучення більшої кількості клієнтів до використання інтермодальних сервісів.

Окремої уваги заслуговує оцінка ефективності впровадження нових технологій, яка базується на кількісних даних – операційних ключових показниках ефективності (KPI) та індексах задоволеності користувачів (USI). Концепція «ефективності» як метрики здатності технології задовольнити потреби, розраховується шляхом об'єднання обох типів даних, що дозволяє порівнювати різних постачальників послуг та профілі користувачів.

Трансформація логістичних систем. Важливим напрямком модернізації є трансформація ролі залізничного транспорту в логістичній системі. Політика «переходу з дороги на рейки» вимагає більш тонкого розуміння, ніж просте переміщення вантажів. Ключовим є розвиток інтермодальних перевезень, особливо для несировинних вантажів, та посилення співпраці залізниць з іншими учасниками ринку.

Сучасна методологія підкреслює необхідність відходу від опори лише на власні можливості залізниці та переходу до ролі провідного елемента в логістичному ланцюзі, що характеризується швидкістю, високою вартістю вантажу та сильною координаційною здатністю.

Для систематизації підходів розроблено класифікацію методів модернізації взаємодії. Перша група включає технічні методи: використання конвеєрних систем, роботизованих кранів та крос-докінгу. Друга група – організаційні методи, такі як синхронізація «just-in-time» та створення спільних центрів прийняття рішень. Третя група – цифрові методи, що передбачають використання штучного інтелекту для прогнозування черг. Четверта група охоплює економічні методи стимулювання за позапікове використання терміналів. П'ята група включає екологічні методи, спрямовані на зменшення вуглецевого сліду через оптимізацію маршрутів.

Формульне описання ефективності взаємодії базується на мінімізації загального часу перебування вантажу в транспортному вузлі. Нехай T_{total} – сумарний час, який визначається як:

$$T_{total} = T_{rail} + T_{wait} + T_{trans} + T_{road} \quad (1)$$

де T_{rail} – час прибуття залізничного складу;

T_{wait} – час очікування на терміналі;

T_{trans} – тривалість перевантажувальних операцій;

T_{road} – час подачі та виїзду автотранспорту.

Для модернізованої системи вводиться коефіцієнт технологічної синхронізації K_s :

$$K_s = \frac{\sum(t_i^{rail} \cap t_j^{auto})}{\sum t_i^{rail}} \quad (2)$$

де t_i^{rail} – вікно готовності залізничного сегмента. Період часу, протягом якого залізничний склад готовий до виконання перевантажувальних операцій (прибуття, наявність на терміналі);

t_j^{auto} – вікно готовності автомобільного сегмента. Період часу, коли автотранспорт доступний для завантаження або розвантаження (час подачі та перебування на терміналі).

Цей показник відображає ступінь збігу вікон готовності залізничного та автомобільного сегментів. Модернізація вважається ефективною, якщо K_s наближається до одиниці.

Прикладом застосування даної методології є реорганізація роботи гіпотетичного терміналу. До модернізації середній час очікування автомобіля під завантаження складав 4,5 години через нерівномірне прибуття вагонів. Після впровадження динамічного алгоритму прогнозування, час очікування скоротився до 45 хвилин. Система дозволяє автоматично коригувати графік виїзду фур залежно від реального місцеперебування поїзда на підході. Це забезпечує зниження витрат пального автотранспорту на 12% за рахунок зменшення холостих пробігів.

Додатково впроваджено модель розподілу потужностей перевантажувальної техніки. Розрахунок ведеться за формулою оптимальної кількості постів N :

$$N = \lceil \frac{\lambda}{\mu(1-\rho)} \rceil \quad (3)$$

де λ – інтенсивність вхідного потоку машин;

μ – продуктивність одного крана;

ρ – коефіцієнт завантаження.

Класифікація вантажопотоків за терміновістю дозволяє гнучко змінювати пріоритети в черзі. Для швидкопсувних товарів застосовується алгоритм «зеленого коридору». Математична модель враховує також вірогідність технічних збоїв обладнання. Модернізація передбачає створення резервних технологічних ліній. Важливим аспектом є інтеграція датчиків IoT на залізничні платформи. Це дозволяє в реальному часі відстежувати стан кріплення контейнерів.

Впровадження єдиної цифрової накладної скорочує час документального оформлення на 30%. Система автоматично генерує перепустки для водіїв при входженні вантажу в зону терміналу. Аналіз показує, що модернізація методології взаємодії підвищує рентабельність мультимодальних вузлів на 18-20%.

Соціальний ефект полягає у покращенні умов праці персоналу через автоматизацію рутинних процесів. Екологічний ефект досягається за рахунок концентрації вантажів на залізничних магістралях.

Розроблена структура є універсальною та може бути адаптована для різних географічних умов. Вона закладає фундамент для побудови транспортної мережі майбутнього.

Обговорення отриманих наукових та прикладних результатів. Отримані результати підтверджують гіпотезу про те, що технологічна модернізація неможлива без оновлення методологічного апарату управління.

Розроблена математична модель демонструє високу чутливість до точності вхідних даних про графік руху. Порівняння з існуючими підходами виявило значну перевагу динамічного планування над статичними схемами взаємодії.

Практичне застосування запропонованих рішень дозволяє згладити пікові навантаження на інфраструктуру терміналів.

Важливим висновком є необхідність обов'язкової цифровізації всіх етапів передачі вантажу між видами транспорту.

Висновки.

Розроблені методологічні основи модернізації взаємодії залізничного та автомобільного транспорту дозволяють системно вирішити проблему дискоординації в логістичних ланцюгах.

Результати дослідження вказують на те, що основний резерв підвищення ефективності лежить у площині організаційної координації. Запропоновані коефіцієнти синхронізації можуть бути використані як КРІ для керівництва транспортних вузлів. Встановлено, що ключовим фактором успішної модернізації є створення інтегрованого інформаційного середовища для всіх учасників перевезень.

Запропонована класифікація методів дозволяє диференційовано підходити до модернізації об'єктів залежно від їхнього технічного стану та обсягів вантажообігу.

Математичне моделювання підтвердило можливість скорочення часу очікування транспорту на 70-80% за умови впровадження алгоритмів синхронізації. Визначено параметри ефективності, що дозволяють кількісно оцінити результативність впровадження нових технологічних схем. Доведено, що модернізація взаємодії сприяє суттєвому зниженню собівартості мультимодальних перевезень.

Результати дослідження мають безпосереднє практичне значення для проектування нових та реконструкції існуючих транспортно-логістичних центрів. Дослідження закладає підґрунтя для переходу до інтелектуальних транспортних систем нового покоління.

Впровадження розроблених методологічних положень забезпечує підвищення пропускної здатності транспортних коридорів без надмірних капітальних інвестицій у фізичну інфраструктуру. Економічний ефект від реалізації запропонованих заходів підтверджує їхню доцільність для транспортної галузі країни.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на інтеграцію в дану систему річкового та авіаційного транспорту для створення глобальних транспортних хабів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Meng Y., Wang Z., Lin B. Solving the road–rail intermodal network design problem: A novel 0–1 nonlinear model to consider carbon emission policies. *Mathematics*. 2026. Vol. 14. No. 5. Art. 893. DOI: <https://doi.org/10.3390/math14050893>
2. Gbadegoye J., Camur M. C., Li X. A two-stage stochastic model for road–rail intermodal freight transportation under demand and capacity uncertainty. *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2025.07.004>
3. Gleser M., Elbert R. Combined rail-road transport in Europe: A practice-oriented research agenda. *Research in Transportation Business & Management*. 2024. Vol. 53. Art. 101101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2024.101101>
4. Wang B., Li J., Jiang F. Road–rail intermodal travel mode choice behavior considering attitude factors. *Sustainability*. 2024. Vol. 16. No. 14. Art. 5955. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16145955>
5. Comi A., Hriekova O. A focus on railway shift in urban freight transport: Scenarios and applications. *Future Transportation*. 2024. Vol. 4. No. 3. P. 681–696. DOI: <https://doi.org/10.3390/futuretransp4030032>

6. Sun Y., Sun G., Huang B., Ge J. Modeling a carbon-efficient road–rail intermodal routing problem with soft time windows in a time-dependent and fuzzy environment. *Systems*. 2023. Vol. 11. No. 8. Art. 403. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems11080403>
7. Golovko T., Demchenko I. Analysis of intermodal transport development in European countries and Ukraine. *Modern Engineering and Innovative Technologies*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2023-29-01-043>
8. Sun Y., Yu N., Huang B. Green road–rail intermodal routing problem with improved pickup and delivery services integrating truck departure time planning under uncertainty. *Complex & Intelligent Systems*. 2022. Vol. 8. P. 1459–1486. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00598-1>
9. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Pištěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022. Vol. 10. Art. 1331. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>
10. Kurdiuk S., Dremluk V., Melnyk O., Onishchenko O., Pištěk V., Kučera P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions. *Drones*. 2025. Vol. 9. Art. 174. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones9030174>
11. Butko T. V., Prokhorov V. M., Parkhomenko L. O., Prokopov A. O. Improvement of technology of passenger intermodal transportation with involvement of railway transport in the conditions of tourism development. *Science and Transport Progress*. 2021. No. 1 (91). P. 37–50. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/228106>
12. Gottschalk P. G., Dunn J. R. The five-parameter logistic: A characterization and comparison with the four-parameter logistic. *Analytical Biochemistry*. 2005. Vol. 343. No. 1. P. 54–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ab.2005.04.035>
13. Hassannayebi E., Boroun M., AlaeiJordehi S., Kor H. Train schedule optimization in a high-speed railway system using a hybrid simulation and meta-model approach. *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Vol. 138. Art. 106110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106110>
14. Li Z., Hensher D. A. Crowding and public transport: A review of willingness to pay evidence and its relevance in project appraisal. *Transport Policy*. 2011. Vol. 18. No. 6. P. 880–887. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.06.003>
15. Milbredt O., Rudolph F., Grunewald E., Christ T. Evaluating conditions and impact of intermodal traffic management involving airports and railways. *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. 25. P. 1735–1744. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.132>

D. A. Ivanchenko

Pryazovskiy State Technical University Dnipro, Gogolya St., 29, 49044, Ukraine
Phone: +380963681237, E-mail: ivanchenko_d_a@pstu.edu
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3024-3930>

A. M. Fomina

Pryazovskiy State Technical University Dnipro, Gogolya St., 29, 49044, Ukraine
Phone: +380679354461, E-mail: fomina_a_n@pstu.edu
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9810-8997>

METHODOLOGICAL BASES OF MODERNIZATION OF TECHNOLOGICAL INTERACTION OF RAILWAY AND ROAD TRANSPORT

The current state of the global economy, the growth of international trade and European integration processes in Ukraine require a fundamental revision of approaches to the organization of multimodal transportation. The lack of synchronization of rail and road transport, the lack of a single methodological basis, the fragmentation of data

exchange and outdated principles of terminal operation lead to significant downtime of rolling stock, unjustified financial losses and restrain the country's transit potential. In addition, the environmental vector of development of the European Union dictates the requirements for the reorientation of freight flows to a more energy-efficient railway, which is impossible without close technological integration with road transport. Analysis of recent studies has shown that, despite the significant interest of scientists in individual technical and economic aspects (schedule optimization, environmental restrictions, behavioral factors), comprehensive methodological foundations for the modernization of technological interaction of these modes of transport remain insufficiently developed. There is no single conceptual approach to the formation of dynamic models of integrated processes at transshipment hubs in the scientific literature, which creates a theoretical vacuum.

The purpose of the article is to develop and scientifically substantiate the methodological foundations of the modernization of technological interaction of rail and road transport to increase the efficiency of multimodal transportation. The research is aimed at creating models and algorithms for seamless integration of logistics processes at the junction of different transport systems, ensuring the minimization of total costs and increasing the throughput of transport hubs.

The article proposes a classification of modernization methods, which includes five groups: technical (conveyor systems, robotic cranes, cross-docking), organizational (just-in-time synchronization, joint decision-making centers), digital (artificial intelligence for predicting queues, IoT sensors), economic (stimulating off-peak use of terminals) and environmental (reducing the carbon footprint through route optimization). Mathematical models have been developed, in particular the technological synchronization coefficient, which reflects the degree of coincidence of the readiness windows of the railway and automobile segments, as well as a formula for determining the optimal number of loading posts. The use of a single digital consignment note reduces the time for document processing by 30%. The implementation of the system allows you to automatically generate passes for drivers, adjust the departure schedule of trucks depending on the actual location of the train and provide a «green corridor» for perishable goods.

Keywords: rail transport, road transport, interaction with infrastructure, multimodal transportation.

REFERENCES

1. Meng, Y., Wang, Z., & Lin, B. (2026). Solving the road–rail intermodal network design problem: A novel 0–1 nonlinear model to consider carbon emission policies. *Mathematics*, 14 (5), 893. DOI: <https://doi.org/10.3390/math14050893>
2. Gbadegoye, J., Camur, M. C., & Li, X. (2025). A two-stage stochastic model for road–rail intermodal freight transportation under demand and capacity uncertainty. *International Journal of Transportation Science and Technology*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2025.07.004>
3. Gleser, M., & Elbert, R. (2024). Combined rail-road transport in Europe: A practice-oriented research agenda. *Research in Transportation Business & Management*, 53, 101101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2024.101101>
4. Wang, B., Li, J., & Jiang, F. (2024). Road–rail intermodal travel mode choice behavior considering attitude factors. *Sustainability*, 16 (14), 5955. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16145955>
5. Comi, A., & Hriekova, O. (2024). A focus on railway shift in urban freight transport: Scenarios and applications. *Future Transportation*, 4 (3), 681–696. DOI: <https://doi.org/10.3390/futuretransp4030032>

6. Sun, Y., Sun, G., Huang, B., & Ge, J. (2023). Modeling a carbon-efficient road–rail intermodal routing problem with soft time windows in a time-dependent and fuzzy environment. *Systems*, 11 (8), 403. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems11080403>
7. Golovko, T., & Demchenko, I. (2023). Analysis of intermodal transport development in European countries and Ukraine. *Modern Engineering and Innovative Technologies*. DOI: <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2023-29-01-043>
8. Sun, Y., Yu, N., & Huang, B. (2022). Green road–rail intermodal routing problem with improved pickup and delivery services integrating truck departure time planning under uncertainty. *Complex & Intelligent Systems*, 8, 1459–1486. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00598-1>
9. Sagin, S.; Kuropyatnyk, O.; Sagin, A.; Tkachenko, I.; Pištěk, V.; Kučera, P. (2022). Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe. *J. Mar. Sci. Eng.*, 10, 1331. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>
10. Kurdiuk, S.; Dremliuk, V.; Melnyk, O.; Onishchenko, O.; Pištěk, V.; Kučera, P. (2025). Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions. *Drones*, 9, 174. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones9030174>
11. Butko, T. V., Prokhorov, V. M., Parkhomenko, L. O., & Prokopov, A. O. (2021). Improvement of technology of passenger intermodal transportation with involvement of railway transport in the conditions of tourism development. *Science and Transport Progress*, 1 (91), 37–50. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/228106>
12. Gottschalk, P. G., & Dunn, J. R. (2005). The five-parameter logistic: A characterization and comparison with the four-parameter logistic. *Analytical Biochemistry*, 343 (1), 54–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ab.2005.04.035>
13. Hassannayebi, E., Boroun, M., Alaei Jordehi, S., & Kor, H. (2019). Train schedule optimization in a high-speed railway system using a hybrid simulation and meta-model approach. *Computers & Industrial Engineering*, 138, 106110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106110>
14. Li, Z., & Hensher, D. A. (2011). Crowding and public transport: A review of willingness to pay evidence and its relevance in project appraisal. *Transport Policy*, 18 (6), 880–887. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.06.003>
15. Milbredt, O., Rudolph, F., Grunewald, E., & Christ, T. (2017). Evaluating conditions and impact of intermodal traffic management involving airports and railways. *Transportation Research Procedia*, 25, 1735–1744. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.132>



Стаття надійшла 06.04.2026
Стаття прийнята 14.04.2026
Опубліковано 29.05.2026

І. В. Гладких

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна

Тел.: +380631715009, E-mail: innagladkih59@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8674-2659>

Д. О. Брусило

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна

Тел.: +380962055692, E-mail: tyschkovez28@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9976-0793>

СУЧАСНІ СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ГАЛУЗІ У ФОКУСІ МІЖНАРОДНИХ ПОДІЙ

Сучасна залізнична індустрія переживає період значних змін, зумовлених потребами сталого розвитку, зростанням пасажирських і вантажних потоків, а також впровадженням новітніх технологій. Рейковий рухомий склад, який є основою залізничної системи, активно модернізується в багатьох країнах світу.

Попередній рік став важливим етапом розвитку світової залізничної індустрії. Продовжується тенденція переходу на екологічно чисті технології, цифровізацію, автоматизацію та інтеграцію залізничних мереж у міжнародні логістичні коридори. У центрі міжнародних подій і тенденцій розвитку галузі – підвищення енергоефективності, безпеки, модульності та універсальності перевезень, а також інтеграція у міжнародні транспортні коридори.

Метою цієї роботи є аналіз світових тенденцій і перспектив розвитку інноваційного рейкового рухомого складу шляхом вивчення цілеспрямованих досліджень, інновацій та ринкових рішень щодо прискорення інтеграції нових і передових технологій у залізничну продукцію.

Однією з головних тенденцій є зменшення викидів та підвищення енергоефективності. На багатьох європейських маршрутах активно впроваджують електропоїзди з батарейними та гібридними системами, що дозволяє зменшити залежність від викопного палива. Японія та Німеччина експериментують із використанням водневих локомотивів, які практично не забруднюють навколишнє середовище. Інновації у сфері цифрових технологій сприяють підвищенню безпеки та ефективності руху. Використання систем автоматичного управління поїздами та цифрових датчиків дає змогу контролювати стан рухомого складу в реальному часі. У Нідерландах та Франції впроваджують цифрові «розумні» колії, які передають дані про навантаження, температуру та стан рейок.

Сучасні потяги орієнтовані на комфорт пасажирів. Високошвидкісні потяги, такі як французькі TGV та японські Shinkansen, вже досягають швидкості

© Гладких І. В., Брусило Д. О., 2026

понад 300 км/год. Інноваційні рішення включають покращену шумоізоляцію, ергономічні сидіння, бездротовий інтернет та інтерактивні інформаційні системи на борту.

Сучасні виробники створюють модульні потяги, які легко адаптуються до різних маршрутів і потреб перевезень. Це дає змогу швидко змінювати конфігурацію вагонів відповідно до пасажиропотоку чи виду вантажу.

У світі активно розвивається інтеграція залізниць у міжнародні логістичні мережі. Особливо це помітно в межах ініціативи «Один пояс, один шлях», де маршрути між Європою та Азією стали важливими для вантажних перевезень.

Ключові слова: рейковий транспорт, екологічність, цифрова трансформація, радіоканальне управління поїздами, енергоефективність.

Вступ та постановка проблеми. Глобальні виклики, пов'язані з кліматичними змінами та екологічною нестабільністю, змушують транспортну індустрію шукати нові, більш сталі рішення. Основне завдання сьогодення в умовах інтеграції України в Європейський простір є відповідність транспорту та транспортних комунікацій держави з найменшими витратами та збереженням національного інтелектуального фонду. На основі постійного аналізу ринкових тенденцій розробляються стратегії щодо освоєння нових напрямків діяльності і випуску нової науково-технічної продукції, яка була б корисна для потенційних замовників.

Аналіз останніх досліджень. Останні дослідження в галузі інновацій рейкового транспорту демонструють активний розвиток у кількох ключових напрямках: штучний інтелект, екологічна модернізація, цифрова трансформація, радіоканальне управління поїздами, енергоефективність, а також інтермодальність транспорту [1].

Перспективним інноваціям на залізничному транспорті присвячені роботи багатьох вітчизняних та зарубіжних вчених. У статті [2] автором проведено огляд передових технологій на залізничному транспорті, спрямованих на підвищенні рівня їх інтелектуальності, безпечності та екологічності. Розглянуті питання запровадження нових технологій руху, удосконалення інформаційно-телекомунікаційних систем, використання промислового інтернету та сучасних енергоефективних рішень. Доповідь автора [3] присвячена новітній концепції та сервісам мережі мобільного зв'язку 5G (IMT-2020). Представлені основні вимоги та концептуальні підходи до побудови транспортної мережі мобільного зв'язку 5G для забезпечення цих сервісів.

В статтях [4, 5] автори досліджують тенденції розвитку інтермодальної логістики та адаптації залізничної інфраструктури до кліматичних викликів. Автори відмічають, що позитивну роль в процесі надання послуг з перевезення вантажів відіграє удосконалення інформаційних систем, підвищення рівня взаємодії між різними видами транспорту, оптимізація логістичних процесів.

Проведений огляд попередніх публікацій показує, що здебільшого науковці окреслюють загальну проблематику, з якою стикається залізничний транспорт в процесі запровадження перспективних інноваційних рішень.

Мета статті. Метою даної статті є аналіз сучасних міжнародних подій та тенденцій розвитку залізничної галузі у 2025 році, а також дослідження тенденцій та інновацій у сфері рейкового рухомого складу, зокрема у галузі цифрової трансформації, радіоканального управління поїздами, а також, підвищення енергоефективності та інтермодальності транспорту.

Матеріал та результати досліджень. Інноваційний рейковий транспорт – це майбутнє, яке вже починає втілюватись у життя. Він поєднує в собі екологічність,

швидкість, комфорт і технологічність. Це ключовий напрям у сфері сталого розвитку інфраструктури та мобільності.

Далі наведено огляд основних міжнародних подій та тенденції розвитку залізничної галузі у 2025 році.

У 2025 році залізнична галузь розвивалася в умовах активної міжнародної взаємодії, що проявилось у проведенні низки профільних форумів, виставок, самітів і конференцій, присвячених питанням розвитку інфраструктури, рухомого складу, цифровізації, енергоефективності та сталого транспорту. Ці заходи стали важливими майданчиками для обміну досвідом, презентації інноваційних рішень і формування стратегічних напрямів розвитку галузі.

На початку року відбулися заходи, спрямовані на вдосконалення управління пропускнуою спроможністю та міжнародною координацією залізничного руху. Зокрема, у січні у Відні пройшов саміт RailNetEurope, у межах якого було розглянуто питання регулювання пропускнуої спроможності, управління рухом поїздів та цифрових інструментів координації між інфраструктурними операторами [6].

У лютому в Брюсселі відбулися події, присвячені інвестиційній політиці та стратегічному розвитку залізничного транспорту Європейського Союзу. Проведення церемонії European Railway Award та тематичних дебатів у Європарламенті засвідчило зростаючу роль залізничного транспорту як ключового елементу сталої мобільності, конкурентоспроможності економіки та досягнення кліматичних цілей [7].

У березні значна увага була приділена розвитку інтермодальної логістики та адаптації залізничної інфраструктури до кліматичних викликів. У Німеччині відбувся міжнародний форум Europe–Asia Intermodal Logistics, де обговорювалися питання формування нових транспортних коридорів між Європою та Азією. Водночас у штаб-квартирі Міжнародного союзу залізниць (UIC) у Парижі розглядалися стратегії адаптації залізничної інфраструктури до екстремальних погодних умов і змін клімату [8].

Протягом весни та літа 2025 року відбулися заходи, спрямовані на розвиток міжнародного співробітництва та відновлення транспортної інфраструктури України. Зокрема, було проведено Український транспортний форум в Одесі, а також Міжнародну конференцію з питань відновлення України (URC2025) у Римі, де обговорювалися питання модернізації транспортної системи, залучення інвестицій і інтеграції України до європейського транспортного простору.

У другій половині року ключову роль відігравали міжнародні спеціалізовані виставки та саміти, присвячені рухомому складу, залізничному обладнанню, цифровим рішенням та інноваціям. Серед них – виставки TRAKO у Польщі (рис. 1, 2), EXPO Ferroviaria в Італії, International Railway Equipment Exhibition в Індії та Rail Live в Іспанії. Ці заходи продемонстрували актуальні тенденції розвитку залізничної галузі, зокрема впровадження енергоефективних технологій, автоматизації, систем моніторингу та нових матеріалів для рухомого складу.

Загалом проведені у 2025 році міжнародні заходи засвідчили посилення ролі залізничного транспорту у забезпеченні сталого розвитку, підвищенні енергоефективності та інтеграції національних транспортних систем у глобальні логістичні мережі. Для України участь у таких подіях створила передумови для запозичення передового досвіду, впровадження інноваційних рішень та формування стратегічних напрямів розвитку залізничної галузі [9].

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД



а)



б)

Рис. 1. Сучасні зразки інноваційного рейкового рухомого складу

а) багатосистемний електровоз Gama з дизельним модулем для маневрової та автономної роботи

б) електропоїзд Elf, призначений для приміських і регіональних пасажирських перевезень



Рис. 2. Siemens Mobility вперше представила в Польщі Vectrain – транспортний засіб, що поєднує локомотив Vectron із сучасними вагонами Vectouro, включаючи вагон керування

Інноваційні рішення у конструкції та матеріалах рухомого складу

У червні 2025 року компанія Alstom, один із провідних світових виробників рухомого складу та комплексних залізничних рішень, оголосила про стратегічне партнерство з компанією Outokumpu – міжнародним лідером у виробництві нержавної сталі з фокусом на зниження вуглецевого сліду. Співпраця спрямована на впровадження низьковуглецевої нержавної сталі у виробництво вагонів метро серії Metropolis та є складовою довгострокової екологічної стратегії Alstom. Відповідно до екодизайнерських принципів компанії, до 2030 року передбачено скорочення викидів CO₂ на 30 % у частині закупівель матеріалів і послуг, а практичне використання нових матеріалів у серійному виробництві заплановано з 2026 року.

Ключовим елементом партнерства стало застосування інноваційної нержавіючої сталі Circle Green виробництва Outokumpu, яка характеризується суттєво зниженим вуглецевим слідом порівняно з традиційними марками сталі. Досягнення такого ефекту забезпечується завдяки високій частці вторинної сировини та оптимізованим виробничим процесам, що дозволяє скоротити викиди CO₂ до 93 %. Використання цього матеріалу у зовнішніх конструктивних елементах рухомого складу сприяє зменшенню загального життєвого вуглецевого сліду вагонів метро, що на-

буває особливого значення в умовах реалізації кліматичних цілей Європейського Союзу та переходу до сталих моделей міської мобільності. Для компанії Outokumpu дана угода стала найбільшим контрактом у секторі мобільності, що свідчить про зростаючу роль екологічно відповідальних матеріалів у сучасному транспортному машинобудуванні.

Інтеграція сталі Circle Green у конструкцію рухомого складу нового покоління дозволяє поєднати екологічні переваги з високими експлуатаційними характеристиками, зокрема довговічністю, корозійною стійкістю та придатністю до повторної переробки. Таким чином, інновації у матеріалах перестають бути допоміжним елементом і перетворюються на системний чинник підвищення ефективності, надійності та конкурентоспроможності рухомого складу. Реалізація принципів сталого розвитку на етапі проєктування забезпечує довгостроковий позитивний ефект протягом усього життєвого циклу транспортних засобів, починаючи від виробництва та закінчуючи експлуатацією й утилізацією.

Окремо слід зазначити, що матеріальні інновації є складовою комплексного підходу Alstom до розвитку залізничного транспорту, який поєднує оновлення рухомого складу, впровадження сучасних систем сигналізації та управління рухом, а також підвищення рівня безпеки та надійності перевезень. Прикладом такого підходу є реалізація проєктів з модернізації та технічного обслуговування метрополітенів у країнах Європи, що свідчить про здатність компанії інтегрувати технологічні, екологічні та експлуатаційні рішення в єдину ефективну систему.

Загалом партнерство між Alstom та Outokumpu демонструє, що інновації у конструкційних матеріалах можуть стати дієвим інструментом зниження екологічного навантаження залізничного транспорту без втрати технічних і експлуатаційних характеристик. Така модель співпраці між виробниками рухомого складу та постачальниками матеріалів формує передумови для подальшого поширення принципів сталого розвитку у залізничній галузі та може розглядатися як орієнтир для майбутніх інноваційних проєктів у сфері транспорту [10].

У вересні 2024 року компанія CRRC Qiqihar представила новий важкий вантажний вагон з легкого композитного матеріалу на основі вуглецевого волокна, розроблений у співпраці з China Energy Railway Equipment Company та Національним інститутом чистої та низьковуглецевої енергетики. Перший демонстраційний зразок (рис. 3) був презентований 10 вересня 2024 року та став прикладом інтеграції передових матеріалів у залізничний транспорт.

Основна несуча конструкція кузова виготовлена із композитного матеріалу на основі вуглецевого волокна, який забезпечує суттєве підвищення міцності при одночасному зменшенні маси. Порівняно з традиційними матеріалами, такими як алюмінієві сплави, новий композит має вищу питомо-міцносну характеристику та модуль пружності, що дозволяє знизити власну вагу вагона більш ніж на 20 %. Це дає вагону показник співвідношення маси до вантажопідйомності на рівні 0,22, що є одним із найкращих серед вантажних вагонів аналогічного типу в Китаї. Крім того, вагон оснащений інтелектуальною системою моніторингу, яка інтегрує технології Інтернету речей, великі дані та обчислення, що дозволяє в режимі реального часу контролювати стан вагона та підвищує ефективність експлуатації. Цей проєкт демонструє сучасний підхід до поєднання легких матеріалів і цифрових технологій, забезпечуючи одночасно економію енергії, підвищення надійності та стійкості до інтенсивних вантажних навантажень. Впровадження легких композитних матеріалів у вантажні вагони відкриває нові можливості для підвищення енергоефективно-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

сті залізничних перевезень, зниження експлуатаційних витрат та скорочення вуглецевого сліду залізничного транспорту, що відповідає глобальним трендам сталого розвитку [11].



Рис. 3. Демонстраційний зразок компанії CRRC Qiqihar

Розвиток високошвидкісного руху та цифрових систем управління

Європа зараз є найбільшим у світі ринком технологій контролю, управління та сигналізації (CCS), а модернізація старіючих залізничних мереж стимулює зростання, випереджаючи Китай.

Згідно з новим дослідженням ринку, проведеним SCI Verkehr провідної німецької консалтингової компанії у сфері транспорту та залізниць, на Європу зараз припадає майже половина світового ринку уловлювання та зберігання вуглецю, який оцінюється приблизно в 20 мільярдів євро. Основною рушійною силою є не масштабне нове будівництво, а оновлення та цифрова модернізація існуючих мереж. Близько 90% європейського ринку CCS у 2025 році пов'язане з модернізацією та обслуговуванням існуючої мережі, тоді як лише 10% пов'язане з новою інфраструктурою. Водночас у звіті підкреслюється, що Європа все ще відстає від Азії в загальній стандартизації та розгортанні сигналізації. Інтероперабельність залишається структурною проблемою, а національні підходи продовжують уповільнювати гармонізацію систем керування поїздами. Впровадження ETCS неодноразово відкладалося в кількох країнах, а це означає, що розрив між політичними амбіціями та впровадженням залишається помітним на всьому континенті. Очікується, що протягом наступного десятиліття європейський ринок буде формуватися, перш за все, під впливом ETCS, цифрових центральних систем та прогресу в FRMCS, майбутньої системи мобільного залізничного зв'язку, яка має замінити GSM-R. Разом ці технології дедалі частіше розглядаються як основа цифровізації залізниць, що тісніше, ніж раніше, пов'язує сигналізацію, захист поїздів, зв'язок та експлуатаційне управління. Китай залишається домінуючою силою в Азії, на частку якого припадає понад 65% регіонального ринку CCS. Там зростання все ще зумовлене розширенням високошвидкісного транспорту та метро, хоча й повільнішими темпами, ніж у попередньому десятилітті. Водночас Китай просуває цифрові та автоматизовані залізничні операції, включаючи масштабні інвестиції в сучасне управління поїздами та залізничний зв'язок на базі 5G.

У світовому масштабі системи керування поїздами зараз є найбільшим сегментом продукції на ринку CCS, на який припадає близько 40% від загального обсягу.

SCI Verkehr стверджує, що ці системи стимулюють ширший технологічний зсув, забезпечуючи ефективніше використання обмеженої інфраструктури, автоматизовані операції, кращу енергоефективність та вищий комфорт пасажирів. Нові покоління ETCS та CBTC також стимулюють попит у суміжних сегментах, таких як цифрові центральні системи та операційна телематика. Дослідження також вказує на сильний попит на міські залізниці. Оператори метрополітену та приміських залізничних перевезень значно інвестують у системи управління та контролю CCS, оскільки міста шукають ефективніші транспортні системи з низьким рівнем викидів. Проекти високошвидкісних залізниць в Азії, особливо в Китаї, та в Європі збільшують попит на передові системи сигналізації та керування поїздами.

Загалом, у звіті зазначається, що ринок CCS вступає в нову фазу, в якій модернізація стає важливішою, ніж просто розширення, особливо в Європі. Для залізничної галузі це означає, що сигналізація вже не є лише технічною підсистемою: вона відіграє дедалі більш важливу роль у стратегії розвитку потужностей, автоматизації, контролі витрат та ширшій цифровій трансформації залізниці [12].

Технологія CBTC 5G

Технологія CBTC 5G привертає увагу операторів і виробників, адже вона поєднує радіоканальне управління поїздами з приватною мережею 5G, забезпечуючи швидший обмін критично важливими даними та розширені можливості для тестування.

CBTC (Communication-Based Train Control) – це сучасна система керування рухом поїздів на основі бездротового зв'язку, яка дозволяє контролювати відстань між поїздами та регулювати їх швидкість у реальному часі.

Інтеграція **технології 5G** забезпечує високу пропускну здатність, мінімальні затримки та покращену надійність комунікації між поїздом і системами управління. Це відкриває новий рівень автоматизації та безпеки залізниць і міських метрополітенів.

CAF і Cellnex у розвитку інноваційних залізничних систем

1. CAF (Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles) – іспанська компанія, один із провідних світових виробників залізничного рухомого складу та рішень для автоматизованого транспорту.

2. Cellnex Telecom – іспанський лідер у сфері телекомунікаційної інфраструктури, активно працює над цифровізацією транспорту, включаючи залізниці.

Спільні ініціативи CAF і Cellnex

- **CBTC + 5G:** CAF розробляє поїзди та системи управління, а Cellnex забезпечує високошвидкісну комунікацію 5G.

- **Модульні автоматизовані рішення:** дозволяють швидко впроваджувати автономні поїзди в метрополітенах та регіональних мережах.

- **Екологічні рішення:** поєднання батарейних та водневих поїздів CAF з цифровим управлінням Cellnex дозволяє знизити викиди CO₂ на 30–50% порівняно з традиційними дизельними поїздами.

CAF і Cellnex провели повну валідацію системи CBTC Optio, застосувавши приватну мережу зв'язку стандарту 5G для передавання даних у тестовому середовищі. Вони підтвердили, що інфраструктура 5G забезпечує стабільний обмін інформацією, і наголосили на важливості високої швидкості та низької затримки для виконання ключових функцій. Система Optio пройшла як лабораторні випробування, так і польові тести, тому компанії отримали можливість порівняти роботу в різних умовах. CAF нагадала, що вперше представила Optio на виставці InnoTrans 2024, а наприкінці того ж року завершила роботи зі створення системи. Компанії розглядають тестування у приватній мережі як важливий елемент підвищення точності

передавання даних. Cellnex приєдналася до проєкту завдяки своєму досвіду в управлінні телекомунікаційною інфраструктурою в Іспанії та інших європейських країнах. Вона надала платформу для розгортання приватної 5G-мережі, що дозволило провести випробування без зовнішнього трафіку. У підсумку обидві компанії підтвердили, що мережа 5G підходить для використання в системах CBTC і забезпечує потрібні параметри зв'язку.

Поява CBTC 5G посилює інтерес до цифрових систем управління, тому що ця технологія створює умови для точного передавання даних між поїздом та інфраструктурою. Компанії зазначають, що низька затримка й достатня швидкість обміну інформацією допомагають підтримувати стабільну роботу систем, залежних від радіоканального зв'язку. Крім того, оператори розглядають приватні мережі 5G як інструмент підвищення стійкості до зовнішніх загроз. Системи CBTC давно застосовують у міських транспортних мережах, проте використання приватних 5G-мереж дозволяє покращувати якість зв'язку без навантаження від комерційного трафіку. Такий підхід особливо важливий там, де потрібні постійний моніторинг руху поїздів та своєчасна передача сигнальної інформації. Тому великі оператори й виробники все частіше вивчають поєднання CBTC і 5G як перспективний напрям.

Попри це компанії поки не розкривають подальші плани щодо комерційного впровадження технології й обмежуються описом досягнутих результатів. CAF і Cellnex зосередили увагу на підтверджених параметрах, отриманих під час лабораторних і польових випробувань. Розробники продовжують удосконалювати системи CBTC, і тому приватні мережі 5G набувають все більшого значення у майбутніх рішеннях [13].

У лютому 2025 року компанія Deutsche Bahn (DB) уклала масштабний довгостроковий рамковий контракт з чотирма провідними компаніями залізничної індустрії – MerMec Deutschland, Hitachi Rail GTS Deutschland, Alstom та Siemens Mobility у партнерстві з Leonhard Weiss (Leonhard Weiss GmbH & Co. KG – одна з провідних німецьких будівельних і інженерних компаній, яка спеціалізується на будівництві та модернізації залізничної інфраструктури) – на постачання та впровадження цифрових систем управління та технологій безпеки на залізничних коліях у Німеччині. Основні види продукції та технології цих компаній наведено в табл. 1. Загальна вартість контракту становить 6,3 млрд євро.

Договір охоплює постачання та інтеграцію ключових цифрових технологій: цифрових диспетчерських технологій (DSTW), Європейської системи керування поїздом (ETCS) та інтегрованих систем управління та експлуатації залізничного руху. У межах рамкового контракту DB передбачила закупівлю 15 500 контрольних блоків до кінця 2028 року, а впровадження систем триватиме до 2032 року. Зокрема, частка компанії Alstom у контракті передбачає постачання щонайменше 1 890 контрольних блоків на суму понад 600 млн євро, інтегруючи цифрові диспетчерські та керуючі технології у відповідності зі стандартами ETCS. Постачання здійснюватиметься у кілька фаз у період 2025–2028 років із завершенням робіт до 2032 року. Участь Hitachi Rail охоплює цифрові диспетчерські системи, ETCS-сигналізацію та інтегровану систему управління, що надає компанії право брати участь у майбутніх проєктах цифровізації залізниці в Німеччині. Siemens Mobility у партнерстві з Leonhard Weiss та MerMec Deutschland також забезпечуватимуть постачання та встановлення цифрових систем управління та безпеки в рамках контракту [14].

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таблиця 1. – Порівняльна характеристика компаній

Компанія	Основні продукти/технології	Напрямок у 2025 р.	Особливості
MerMec Deutschland	Моніторинг колії, прогнозне обслуговування	Цифрові сенсори, IoT	Контроль дефектів рейок у реальному часі
Hitachi Rail GTS Deutschland	Сервіс та модернізація поїздів	CBTC, АТО, IoT	Технічне обслуговування та модернізація рухомого складу
Alstom	Високошвидкісні, водневі та батарейні поїзди	CBTC, автоматизація	Впровадження екологічних технологій
Siemens Mobility	ICE, Velaro, CBTC, IoT	5G, автоматизація	Комплексні рішення для залізниць та метро

Розвиток високошвидкісного руху та цифрових систем управління неможливий без кількох ключових компонентів, які створюють основу для безпечного та ефективного функціонування сучасного транспорту: надійної інфраструктури, цифрових систем управління, сучасних джерел енергії, технологій зв'язку та передачі даних, а також кваліфікованого персоналу і новітніх наукових розробок.

Висновки

Дослідження міжнародних тенденцій та інновацій у сфері рейкового рухомого складу показало, що провідні залізничні компанії світу орієнтуються на комплексну технологічну трансформацію, яка поєднує застосування легких і високоміцних матеріалів, розвиток енергоефективних та низьковуглецевих технологій тяги, а також масштабну цифровізацію процесів управління та експлуатації. Активне впровадження автоматизованих систем управління рухом, систем моніторингу технічного стану в режимі реального часу та Європейської системи управління залізничним рухом (ERTMS) дозволяє суттєво підвищити рівень безпеки, пропускну спроможність інфраструктури та ефективність використання рухомого складу.

Ключовими міжнародними компаніями, що займаються модернізацією та впровадженням нових технологій на рейковому рухомому складі, є: Alstom, CRRC, CAF, Siemens Mobility, Hitachi Rail GTS Deutschland. Одними із відомих компаній з виробництва нових матеріалів для рухомого складу є: Outokumpu, China Energy Railway Equipment Company та Національний інститут чистої та низьковуглецевої енергетики. Вагомий внесок у цифровізацію транспорту вносить іспанська компанія Cellnex Telecom у кооперації з CAF.

На основі постійного аналізу ринкових тенденцій розробляються стратегії щодо освоєння нових напрямків розвитку галузі і випуску нової науково-технічної продукції, яка була б корисна для потенційних замовників.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДР № 0125U001177 Звіт про НДР «Аналіз стану, тенденцій і перспектив розвитку галузі з науково-технічного напрямку «Рейковий рухомий склад залізниць» / керівник Сулим А. О., викон. Гладких І. В., Брусило Д. О. Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2025. 46 С.
2. Kljaić Z., Pavković D., Cipek M., Trstenjak M., Mlinarić T.J., Nikšić M. An Overview of Current Challenges and Emerging Technologies to Facilitate Increased Energy Efficiency, Safety, and Sustainability of Railway Transport. *Future Internet*. 2023. № 15 (11). 347. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi15110347>

3. Носков В. І. Особливості транспортної мережі 5G для впровадження сучасних сервісів. Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи телекомунікацій». С. 59–61. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://conferenc-journal.its.kpi.ua/article/view/255649>
4. Крамський С. О., Целлер В. І. Аналіз інтермодальної логістики у вимірі інновацій в умовах турбулентності під час війни. *Цифрова економіка та економічна безпека*. 2025. № 1 (16). С. 81-87. DOI: <https://doi.org/10.32782/dees.16-12>
5. Обруч Г. В. Цифрова трансформація підприємств залізничного транспорту в умовах розбудови глобального цифрового транспортно-логістичного простору. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2021. № 74. С. 91-101. DOI: <https://doi.org/10.18664/btie.74.280951>
6. RailNetEurope Summit on Capacity Regulation. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://rne.eu/event/rne-summit-2025>
7. European Railway Award 2025. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://trimis.ec.europa.eu/event/european-railway-award-2025>
8. EUROPE-ASIA INTERMODAL LOGISTICS 2025: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.rdl.group/intermodal-europe-2025/>
9. Виставка залізничних технологій і рухомого складу TRAKO-2025. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.railinsider.com.ua/zaliznychni-podii-forumy-vystavky-2025/>
10. Alstom, Outokumpu: Rail Innovations, Sustainable Transport Future. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://railwaynews.net/alstom-outokumpu-rail-innovations-sustainable-transport-future.html?>
11. CRRC Qiqihar unveils lightweight carbon fiber freight wagon for heavy-duty rail transport. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://en.railmarket.com/news/technology-innovation/24479-renfe-mercancias-implements-new-digital-management-systems-at-intermodal-terminals?region=sa&>
12. Європа лідирує на світовому ринку залізничної сигналізації. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://en.railmarket.com/news/business/53444-europe-leads-global-rail-signalling-market>
13. CBTC 5G: нові можливості цифрового управління рухом поїздів. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.railway.supply/uk/cbct-5g-novi-mozhливosti-czifrovogo-upravlinnya-ruhom-po%D1%97zdiv/?>
14. DB Awards more long-term contracts for digital control and safety technology. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://railmarket.com/news/infrastructure/29964-lisbon-madrid-high-speed-rail-gains-eu-approval-with-phased-timeline-through-2034?region=ap&>

I. V. Hladkykh

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, Poltava region, 39621, Ukraine
Tel.: +380631715009, E-mail: innagladkih59@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8674-2659>

D. O. Brusylo

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, Poltava region, 39621, Ukraine
Tel.: +380962055692, E-mail: tyschkovez28@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9976-0793>

MODERN GLOBAL TRENDS AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF THE RAILWAY INDUSTRY IN THE FOCUS OF INTERNATIONAL EVENTS

The modern railway industry is undergoing a period of significant change, driven by the need for sustainable development, increase in passenger and freight traffic, and the introduction of the latest technologies. Rolling stock, which forms the heart of the

railway system, is experiencing an active modernisation in many countries around the world.

The year 2025 has become a key milestone in the development of the global railway industry. The trend towards environmentally friendly technologies, digitalisation, automation and the integration of railway networks into international logistics corridors continues. International events and trends in the railway sector focus on improving energy efficiency, safety, the modularity and versatility of transport, as well as integration into international transport corridors.

The aim of this work is to analyse global trends and prospects for the development of innovative railway rolling stock by identifying targeted research and innovation, as well as market-driven solutions to accelerate the integration of new and advanced technologies into innovative solutions for railway products.

One of the key trends is the reduction of emissions and the improvement of energy efficiency. Electric trains equipped with battery and hybrid systems are being actively introduced on many European routes, thereby reducing dependence on fossil fuels. Japan and Germany are experimenting with hydrogen-powered locomotives, which cause virtually no environmental pollution.

Innovations in digital technology are helping to improve safety and operational efficiency. The use of automatic train operation systems and digital sensors allows the condition of rolling stock to be monitored in real time. In the Netherlands and France, digital «smart» tracks are being introduced, which transmit data on load, temperature and the condition of the rails.

Modern trains are designed with passenger comfort in mind. High-speed trains, such as the French TGV and Japanese Shinkansen, already reach speeds of over 300 km/h. Innovative solutions include improved soundproofing, ergonomic seats, wireless internet and interactive on-board information systems.

The integration of railways into international logistics networks is actively developing worldwide. This is particularly evident within the «Belt and Road» initiative, where rail routes between Europe and Asia are becoming key arteries for freight transport.

Keywords: rail transport, environmental friendliness, digital transformation, radio channel train control, energy efficiency.

REFERENCES

1. Hladkykh, I.V., Brusylo, D. O, & Sulym, A. O (Ed.) (2025). Zvit pro NDR «Analiz stanu, tendentsii i perspektyv rozvytku haluzi z naukovo-tekhnichnoho napriamu «Reikovy rukhomiy sklad zaliznyts № 0125U001177» [Report on the research project 'Analysis of the current state, trends and prospects for the development of the industry in the scientific and technical field of «Railway Rolling Stock» No. 0125U001177]. Kremenichuk: SE «UkrNDIV», 46 [in Ukrainian]
2. Kljajić, Z., Pavković, D., Cipek, M., Trstenjak, M., Mlinarić, T.J., & Nikšić, M. (2023). An Overview of Current Challenges and Emerging Technologies to Facilitate Increased Energy Efficiency, Safety, and Sustainability of Railway Transport. *Future Internet*, 5 (11), 347. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi15110347>
3. Noskov, V. I. (2022). Osoblyvosti transportnoi merezhi 5G dlia vprovadzhennia suchasnykh servisiv [Features of the 5G transport network for the implementation of modern services]. *Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia «Perspektyvy telekomunikatsii» – The International Scientific and Technical Conference 'Prospects of telecommunications'* (pp. 59–61). Retrieved from: <https://conferenc-journal.its.kpi.ua/article/view/255649> [in Ukrainian]
4. Kramskyi, S. O., & Tsellier, V. I. (2025). Analiz intermodalnoi lohistyky u vymiri innovatsii v umovakh turbulentnosti pid chas viiny [Analysis of intermodal logistics in terms of innovation under conditions of turbulence during wartime]. *Tsyfrova ekonomika ta ekonomichna bezpeka – Digital Economy and Economic Security*, 1 (16), 81-87. DOI: <https://doi.org/10.32782/dees.16-12> [in Ukrainian]

5. Obruch, H. V. (2021). Tsyfrova transformatsiia pidpriemstv zaliznychnoho transportu v umovakh rozbudovy hlobalnoho tsyfrovoho transportno-lohistychnoho prostoru [Digital transformation of railway transport enterprises in the context of the development of a global digital transport and logistics space]. *Visnyk ekonomiky transportu i promyslovosti – Bulletin of Transport and Industrial Economics*, 74, 91-101. DOI: <https://doi.org/10.18664/btie.74.280951> [in Ukrainian]
6. Rail Net Europe Summit on Capacity Regulation. *rne.eu* Retrieved from: <https://rne.eu/event/rne-summit-2025>
7. European Railway Award 2025. *trimis.ec.europa.eu*. Retrieved from: <https://trimis.ec.europa.eu/event/european-railway-award-2025>
8. EUROPE-ASIA INTERMODAL LOGISTICS 2025. *www.rdl.group*. Retrieved from: <https://www.rdl.group/intermodal-europe-2025/>
9. Vystavka zaliznychnykh tekhnolohii i rukhomoho skladu TRAKO-2025 [TRAKO-2025 Exhibition of Railway Technology and Rolling Stock]. *www.railinsider.com.ua*. Retrieved from: <https://www.railinsider.com.ua/zaliznychni-podii-forumy-vystavky-2025/> [in Ukrainian]
10. Alstom, Outokumpu: Rail Innovations, Sustainable Transport Future. *railwaynews.net*. Retrieved from: <https://railwaynews.net/alstom-outokumpu-rail-innovations-sustainable-transport-future.html?>
11. CRRC Qiqihar unveils lightweight carbon fiber freight wagon for heavy-duty rail transport. *en.railmarket.com*. Retrieved from: <https://en.railmarket.com/news/technology-innovation/24479-renfe-mercancias-implements-new-digital-management-systems-at-intermodal-terminals?region=sa&>
12. Yevropa lidyruie na svitovomu rynku zaliznychnoi syhnalizatsii [Europe leads the global market for railway signalling systems]. *en.railmarket.com*. Retrieved from: <https://en.railmarket.com/news/business/53444-europe-leads-global-rail-signalling-market> [in Ukrainian]
13. CBTC 5G: novi mozhlyvosti tsyfrovoho upravlinnia rukhom poizdiv [CBTC 5G: new possibilities for digital train control. *www.railway.supply*. Retrieved from: <https://www.railway.supply/uk/cbtc-5g-novi-mozhливosti-czifrovogo-upravlinnya-ruhom-po%D1%97zdiv/?> [in Ukrainian]
14. DB Awards more long-term contracts for digital control and safety technology. *railmarket.com*. Retrieved from: <https://railmarket.com/news/infrastructure/29964-lisbon-madrid-high-speed-rail-gains-eu-approval-with-phased-timeline-through-2034?region=ap&>



Стаття надійшла 12.04.2026
Стаття прийнята 10.04.2026
Опубліковано 29.05.2026

І. Е. Мартинов

Український державний університет залізничного транспорту
пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Тел.: +380577301035, E-mail: martinov.hiit@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>

А. В. Труфанова

Український державний університет залізничного транспорту
пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Тел.: +380577301035, E-mail: trufanova@kart.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>

В. О. Шовкун

Український державний університет залізничного транспорту
пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Тел.: +380577301035, E-mail: vadimshovkun62@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1826-6053>

М. В. Дмитренко

Український державний університет залізничного транспорту
пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Тел.: +380577301035, E-mail: lemtr21@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2712-2495>

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КРИШОК РОЗВАНТАЖУВАЛЬНИХ ЛЮКІВ НАПІВВАГОНІВ ПРИ СКИДАННІ ВАНТАЖУ

В статті наведено результати аналізу відмов та пошкоджень основних вузлів універсальних напіввагонів різних моделей та виробників власності АТ «Укрзалізниця». Визначено, що понад 70 % відчеплень напіввагонів на шляху прямування викликано пошкодженням кузовів.

Проведено аналіз причин пошкоджень суцільнометалевих кузовів, що призводять до необхідності позапланового відновлення їх працездатності. Встановлено, що понад 80 % усіх випадків припадає на несправності кришок люків, а також тріщини й злами поперечних балок рами. Різниця в кількості відчеплень у різних моделей напіввагонів українського виробництва знаходиться в межах статистичної похибки. Основний вплив на виникнення тріщин балок та пошкодження люків мають не конструктивні особливості конкретної моделі напіввагона, а способи розвантаження (використання грейферів тощо).

Досвід експлуатації свідчить, що при скиданні вантажу з висоти, відбувається нерівномірний розподіл ударних навантажень на поверхню люків.

© Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Шовкун В. О., Дмитренко М. В., 2026.

Особливо небезпечним є падіння окремих крупногабаритних кусків (глиб) вантажу, яке супроводжується локальними перевантаженнями, що значно перевищують розрахункові статичні значення. У результаті цього виникають пластичні деформації, вм'ятини, тріщини в зоні зварних з'єднань, а також передчасне руйнування елементів конструкції люка.

З метою дослідження напружено-деформованого стану конструкції люка напіввагона при дії ударного навантаження у роботі використано чисельне моделювання. Геометрична модель кузова універсального напіввагона та вантажу була розроблена в середовищі ANSYS. Для підвищення ефективності обчислювального процесу було застосовано підхід локалізації розрахункової області. Чисельне моделювання процесу ударної взаємодії глиби вантажу з конструкцією люка напіввагона виконувалось із використанням явної схеми інтегрування рівнянь руху.

За результатами чисельного моделювання процесу падіння глиби вантажу на люк напіввагона отримано розподілення напружень і деформацій для різних сценаріїв навантаження, які відрізняються висотою падіння та зоною прикладання удару.

Аналіз напружено-деформованого стану показав, що характер розподілу еквівалентних напружень є суттєво неоднорідним і залежить як від геометрії конструкції, так і від місця прикладання ударного навантаження. Максимальні напруження локалізуються в зоні контакту глиби вантажу з поверхнею люка та в елементах, що забезпечують передавання навантаження до рами вагона.

Ключові слова: універсальний напіввагон, кузов, кришка люка, поперечна балка, тріщина, злам.

Вступ. Українські залізниці мають стратегічне значення як для економіки, так і обороноздатності країни. Завдяки розвинутій мережі залізничний транспорт залишається логістичною основою шляхів сполучення країни, особливо для важкої промисловості.

Саме залізничний транспорт є ідеальним засобом транспортування перевезення важких та великогабаритних вантажів, таких як вугілля, руда, нафтопродукти та будівельні матеріали. У порівнянні з автомобільним транспортом один вантажний потяг може замінити десятки важких автомобільних фур, що значно знижує вартість перевезення тони вантажу (особливо на великі відстані).

На відміну від автотранспорту чи авіації, залізниця практично не залежить від погодних умов, що забезпечує стабільність поставок. Саме тому перевезення продукції металургійної та машинобудівної галузей в основному здійснюється саме залізницями. Це стосується і військових перевезень. Існує також екологічний аспект: використання електровозів для тяги поїздів робить цей вид транспорту більш екологічним та економічно привабливим у порівнянні з дизельним автотранспортом.

Парк вантажних вагонів АТ «Укрзалізниця» (далі – УЗ) складається з великого різноманіття типів та моделей вагонів. Його основу складають так звані універсальні вагони: криті, напіввагони, платформи та цистерни для нафтопродуктів. Останніми роками більш широко розповсюдження дістали спеціалізовані вагони: хопери для перевезення сипких вантажів (зерно, цементу тощо), платформи для перевезення контейнерів, спеціалізовані цистерни (для харчових продуктів, хімічних речовин тощо) та ін.

Особлива роль в системі перевезень масових вантажів належить універсальним напіввагонам (НПВ). Вони складають половину робочого парку вагонів УЗ, здійснюють масові перевезення вугілля, щебню, лісоматеріалів, будівельних матеріалів та інших вантажів, що не потребують захисту від атмосферних опадів. Як правило, НПВ експлуатуються максимально інтенсивно та стикаються з екстремальними навантаженнями (особливо під час завантаження та вивантаження).

Також НПВ дуже часто пошкоджуються під час проведення вантажно-розвантажувальних робіт. Грейферні навантажувачі своїми ударами масивними ковшами по стінках та обв'язці вагона призводять до деформації обшивки. Якщо геометрія елементів кузова (особливо верхня обв'язка) при попередній експлуатації змінена у порівнянні з вихідними геометричними розмірами, при розвантаженні на вагоноперекидачах пристрою виникають перекоси кузова.

Взимку вугілля або щебінь можуть примерзати до стінок НПВ. Використання «кирок», відбійних молотків або нерегламентований розігрів вогнем руйнує захисне покриття та прискорює корозію. Відповідно, це вимагає додаткових витрат на відновлення працездатності вагонів.

При завантаженні особливо небезпечним є падіння окремих крупногабаритних кусків (глиб) вантажу, яке супроводжується локальними перевантаженнями, що значно перевищують розрахункові статичні значення.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Питанням забезпечення міцності та надійності універсальних НПВ присвячена значна кількість наукових досліджень як в Україні, так і за її межами. Фахівцями ДП «Український науково-дослідний інститут вагонобудування» у статтях [1, 2] виконано аналіз динаміки перевезення вантажів та визначені найбільш актуальні на даний час типи вагонів. Запропонована процедура вибору раціональної моделі розвитку вітчизняного парку вантажних вагонів з використанням методу експертного оцінювання.

Аналіз досвіду експлуатації НПВ на залізницях Казахстану наведено у статті [3]. Умови експлуатації в цій країні подібні до українських: великі плечі перевезень, суворий клімат та інтенсивне використання масових вантажів. Автори приходять до висновку, що найчастіше пошкоджуються саме кришки розвантажувальних люків. Особливо небезпечним є період ближче до планового ремонту: запас міцності добігає кінця та ймовірність позапланового відчеплення зростає в рази. Це змушує власника проводити позаплановий поточний ремонт (ПТР), що значно дорожче за рахунок логістики до найближчого ремонтного пункту.

У статті [4] викладені основні результати аналізу відмов та пошкоджень кузовів універсальних НПВ, які викликали відчеплення вагону від поїзду для відновлення працездатності. Автори стверджують, що найчастіше в експлуатації виникають несправності запорів кришок розвантажувальних люків, тріщини та злами верхніх і вертикальних листів поперечних балок рами. Це може призвести не лише до втрат вантажу, а й створити загрозу безпеці руху.

Ці ж питання розглядаються у дослідженні [5]. Наведений аналіз результатів експлуатації НПВ свідчить, що після 7–8 років експлуатації кожен НПВ для відновлення працездатності 7–10 разів на рік надходить в поточний ремонт. Серед причин автори виділяють інтенсивний корозійний знос, викликаний агресивним впливом вантажу, що перевозиться, в умовах несприятливого зовнішнього середовища.

Увага дослідників також була спрямована на впровадження для виготовлення кузовів нових конструкційних матеріалів. Так, використання алюмінію замість традиційної сталі в конструкції кузова суттєво зменшує масу тари НПВ, дозволяє збі-

льшити їх вантажопідйомність, продовжити термін служби до 30 років завдяки збільшеній корозійній стійкості [6]. Це підтверджують автори статті [7], де розглянуті конструктивні особливості кузовів деяких моделей сучасних НПВ. Менша маса тари вагону знижує витрати енергоресурсів локомотивами на тягу. У дослідженні [8] стверджується, що кузов вагона, виконаний із застосуванням алюмінієво-магнієвих сплавів дозволить зменшити масу тари на 2 %. Ці сплави дозволяють створювати міцні конструкції без втрати властивостей у зоні зварного шва. При значно меншій густині у порівнянні зі сталлю, вони дозволяють витримувати значні навантаження. Але висока вартість виготовлення алюмінію та його непридатність для традиційних методів зварювання обмежує його застосування у вагонобудуванні.

Авторами досліджень [9, 10] виконано аналіз міцності підлоги НПВ за допомогою методу скінчених елементів. На підставі проведених розрахунків запропоновано конструкцію підлоги кузова НПВ з поліпшеною геометрією. Це дозволяє зменшити еквівалентні напруження до 10 % та суттєво збільшити коефіцієнт запасу міцності у порівнянні з традиційними конструкціями.

У статті [11] розглянуті результати досліджень модернізованих кришок люків НПВ з реалізацією попереднього напруження та полотна з привареними кутниками.

Результати аналізу причин виникнення несправностей НПВ висвітлені у статті [12]. Авторами досліджена міцність несучих конструкцій кузовів та запропоновані конструктивні рішення щодо підсилення найбільш навантажених елементів кузова НПВ: перетворення бічних стінок на основні несучі ферми та використання замкнених профілів для підвищення жорсткості на кручення. Локальне зміцнення зон над візками забезпечують довговічність конструкції при збереженні низького рівня підлоги.

Значна частина досліджень присвячена попередженню пошкоджень кузовів НПВ при рейферному розвантаженні та розвантаженні на перекидачах вагонів. Автори статті [13] аналізують характерні пошкодження кузовів універсальних НПВ після рейферного розвантаження. Це обриви проміжних стояків бокової стіни у місцях опирання на проміжні поперечні балки рами, пошкодження обв'язки та обшиви кришок розвантажувальних люків, пошкодження верхньої обв'язки бокових та торцевих стін. Запропоновано заходи щодо посилення і модернізації зазначених елементів.

У статті [14] стверджується, що процес розвантаження змерзлих вантажів у вагоноперекидачах створює критичні навантаження на кузов. Коли вантаж примерзає до бокових стін НПВ, зусилля, що виникають при його відриві або при роботі вібраційних пристроїв, можуть перевищувати розрахункову міцність елементів НПВ. В контексті збереження міцності кузова авторами виконано огляд технічних рішень для руйнування змерзлого вантажу. Це механічне розпушування, теплове відновлення сипкості та такі специфічні методи, як використання хімічних та профілактичних засобів для запобігання змерзанню ще на етапі завантаження.

У статтях [15, 16], автори зосереджують увагу на динаміці роботи роторного вагоноперекидача як основного джерела навантажень на кузов. Аналітичне визначення інерційних складових дозволяє точно оцінити, що саме відбувається з конструкцією НПВ у момент повороту ротора.

Практика експлуатації свідчить, що при механізованому завантаженні, зокрема при скиданні вантажу з висоти, відбувається нерівномірний розподіл ударних навантажень на поверхню люків. Особливо небезпечним є падіння окремих крупногабаритних кусків (глиб) вантажу, яке супроводжується локальними перевантажен-

нями, що значно перевищують розрахункові статичні значення. У результаті цього виникають пластичні деформації, вм'ятини, тріщини в зоні зварних з'єднань, а також передчасне руйнування елементів конструкції люка. Очевидно, що питання оцінювання локальних ударних впливів від падіння окремих кусків вантажу залишається недостатньо дослідженим.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є аналіз розподілення основних пошкоджень кузовів НПВ, розгляд процесу завантаження сипких та кускових вантажів та взаємодії глиби вантажу з конструкцією люка напіввагона, розрахункова оцінка напружено-деформованого стану елементів кришок люків з урахуванням реальних умов експлуатації.

Матеріали та методи дослідження. В рамках даного дослідження на першому етапі був проведений аналіз відмов та пошкоджень основних вузлів універсальних НПВ власності АТ «Укрзалізниця». Особлива увага була приділена пошкодженням кузовів. Вихідними даними були форми ВУ-23 за 2022-2024 р.

Парк універсальних НПВ складається з великого різноманіття моделей. Переважну більшість складають НПВ моделей 12-9745 виробництва вагоноремонтних заводів України, НПВ моделей 12-783, 12-757, 12-7023 виробництва АТ «Крюківський вагонобудівний завод», 12-4106 виробництва ПАТ «Дніпровагонмаш» та НПВ ще деяких українських виробників. Також експлуатується ряд моделей НПВ, виготовлених російськими та білоруськими вагонобудівними підприємствами. Очевидно, що у 2022 році вони залишились на території України. Необхідно зазначити, що їх кількість незначна, тому в подальших розрахунках вони не враховувались.

У таблиці 1 наведено розподіл основних причин відчеплення універсальних НПВ на шляху прямування. Найбільша частка відмов припадає на масові моделі, що зумовлено як інтенсивністю їх експлуатації, так і значним терміном служби.

Таблиця 1. – Розподіл основних причин відчеплення універсальних НПВ на шляху прямування

Конструктивні елементи вагона	Причини відчеплення по моделям НПВ у %				
	12-9745	12-757	12-783	12-7023	12-4106
Колісні пари	1,67	0,70	2,74	1,13	3,34
Буксові вузли	0,15	0,00	0,18	0,25	-
Візки	3,04	2,51	2,28	1,47	1,81
Автозчепи	1,46	2,11	1,12	0,39	0,97
Автогальма	5,91	3,51	6,33	3,52	7,38
Кузов	77,14	84,34	74,67	83,01	70,66
Інше	10,62	6,83	12,69	10,21	15,81

Аналіз даних, поданих у таблиці 1, свідчить, що саме відмови кузовів викликають переважну більшість відчеплень НПВ на шляху прямування (понад 70 %). Залежність від моделі НПВ практично відсутня.

У таблиці 2 наведено розподіл основних причин пошкоджень кузовів універсальних НПВ.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

*Таблиця 2. – Розподіл основних причин пошкоджень кузовів
універсальних НПВ*

Конструктивні елементи кузова	Причини відчеплення по моделям НПВ у %				
	12-9745	12-757	12-783	12-7023	12-4106
Обрив зварного шва стійки	1,87	2,05	2,43	2,00	2,87
Несправності кришок люків	61,95	58,84	59,25	46,90	67,42
Пошкодження обшивки кузова	2,09	0,12	0,46	0,12	0,75
Тріщини та злами поперечної балки рами	31,57	37,18	33,92	48,67	26,34
Тріщина у вузлах сполучення хребтової та шкворневої балок	0,49	0,12	0,27	0,06	0,12
Обрив по зварюванню, розрив накладок	1,4	1,32	2,8	1,85	0,62
Інше	0,63	0,36	0,87	0,12	1,87

Аналіз наведених даних свідчить про те, що різниця кількості відчеплень через пошкодження кузовних елементів у різних моделей напіввагонів українського виробництва знаходиться в межах статистичної похибки. Тобто основний вплив на виникнення тріщин балок та пошкодження люків мають не конструктивні особливості конкретної моделі, а способи розвантаження (використання грейферів, вібророзвантажувачів) та динамічні удари кускових вантажів о підлогу НПВ під час скидання з висоти.

Відповідно до вимог [17] при розрахунках елементів конструкції вагонів на міцність необхідно враховувати сукупність навантажень, що відповідають різним розрахунковим режимам експлуатації.

У практиці інженерних розрахунків оцінювання ударних навантажень, що діють на люки НПВ при падінні глиби вантажу, здійснюється із застосуванням декількох підходів, які відрізняються рівнем деталізації та точності отриманих результатів.

Найбільш поширеним є інженерний метод, що базується на використанні коефіцієнта динамічності. У межах цього підходу ударне навантаження враховується шляхом множення статичного навантаження на узагальнений коефіцієнт, який враховує динамічний характер взаємодії вантажу з конструкцією. Такий підхід відзначається простотою реалізації та можливістю швидкої оцінки рівня навантаженості елементів, однак має суттєві обмеження.

Альтернативою є чисельні методи дослідження, що реалізуються з використанням сучасних програмних комплексів інженерного аналізу. Разом з тим, чисельні методи потребують значних обчислювальних ресурсів, коректного задання граничних умов, параметрів контакту та моделей матеріалів, що ускладнює їх застосування на етапі попередніх інженерних оцінок.

Попередньо геометрична модель кузова вагона моделі 12-9911 та вантажу була розроблена в середовищі ANSYS Discovery (рис. 1).

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

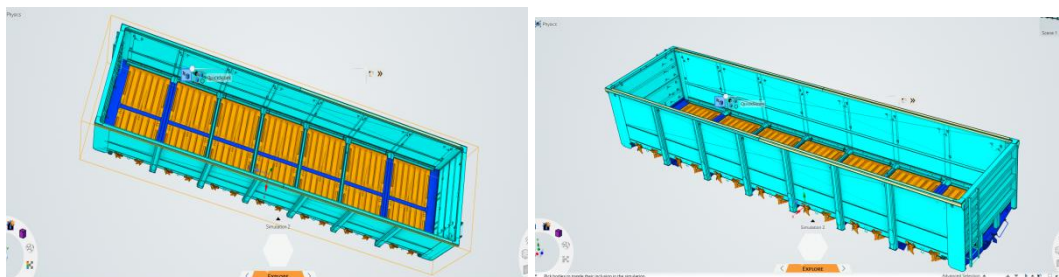


Рис. 1. Геометрична модель кузова напіввагона

Але повномасштабне моделювання всієї конструкції кузова вагона вимагає використання дрібної скінчено-елементної сітки та малих кроків інтегрування для забезпечення стійкості розрахунку. Це потребує значних обчислювальних витрат. Тому для підвищення ефективності обчислювального процесу було застосовано підхід локалізації розрахункової області.

При ударі глиби вантажу основні напруження та деформації мають локальний характер і концентруються в зоні контакту та в елементах, що забезпечують передавання навантаження від люка до елементів несучої конструкції кузова. Тому для вирішення даної задачі доцільно виділити з повної моделі лише найбільш навантажену ділянку, яка безпосередньо бере участь у процесі ударної взаємодії, а саме: конструкції люка, елементів його кріплення та прилеглої частини рами вагона (рис. 2).

При цьому вплив віддалених елементів конструкції кузова враховується опосередковано шляхом задання відповідних граничних умов на межах виділеної області, що імітують жорсткість та інерційні властивості решти конструкції.

На рис. 3 наведено розрахункову схему ударної взаємодії глиби вантажу з конструкцією люка напіввагона.

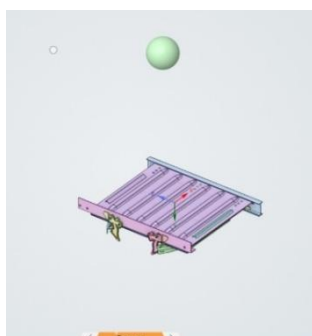


Рис. 2. Модель розвантажувального люка з вантажем

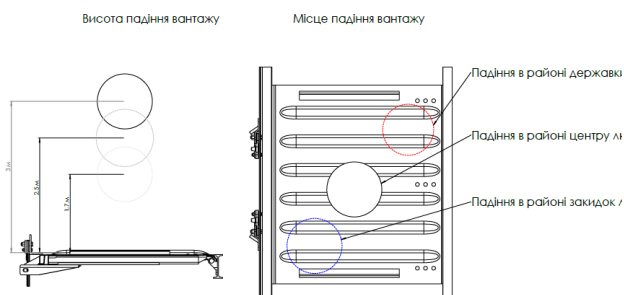


Рис. 3. Схема моделювання падіння глиби вантажу на люк напіввагона

У розробленій моделі передбачено варіювання висоти падіння вантажу в межах 1,7–3,0 м, та маси вантажу в межах 170–370 кг, що відповідає реальним умовам ви-

конання вантажно-розвантажувальних робіт. Для аналізу впливу місця прикладання ударного навантаження необхідно розглядати декілька характерних зон падіння глиби вантажу: центральна частина кришки люка, зона розташування державок та зона закидок люка. Зазначені області відрізняються конструктивною жорсткістю та умовами закріплення, що обумовлює різний характер напружено-деформованого стану при ударі. Центральна частина люка характеризується відносно меншою жорсткістю та більшою схильністю до локальних прогинів, тоді як у зонах державок та закидок спостерігається підвищена жорсткість, що призводить до зростання локальних напружень. В даній статті розглянуто результати дослідження міцності при падінні глиби на середню частину люка.

Глиба вантажу в моделі представлена у вигляді твердого тіла сферичної форми, що дозволяє спростити контактну взаємодію та забезпечити стабільність чисельного розрахунку при використанні явної динаміки.

Просторове представлення моделі дає можливість врахувати геометричні особливості конструкції люка та визначити найбільш небезпечні сценарії навантаження.

У подальшому геометрична модель була перетворена на скінчено-елементну шляхом дискретизації з використанням просторових твердотільних елементів (рис. 4).

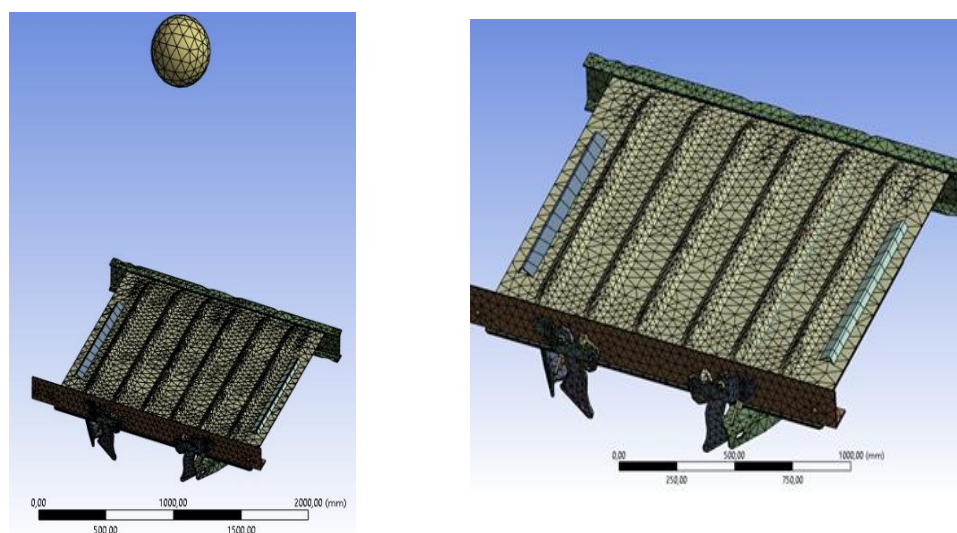


Рис. 4. Побудова сітки скінчених елементів

Для моделювання елементів конструкції люка та прилеглої частини рами застосовано елементи типу SOLID164, які використовуються в задачах явної динаміки та дозволяють враховувати великі переміщення, пластичні деформації та нелінійні контактні взаємодії.

Побудова розрахункової сітки виконувалась із урахуванням геометричних особливостей конструкції та зон можливих концентрацій напружень. З метою підвищення точності розрахунків у зоні передбачуваного контакту глиби вантажу з поверхнею люка було застосовано локальне згущення сітки. У менш навантажених

ділянках використовувалась укрупнена сітка, що забезпечило зниження обчислювальних витрат без суттєвої втрати точності результатів.

Вибір розміру скінченних елементів у зоні контакту здійснювався із застосуванням графоаналітичного методу. Отриманий таким чином раціональний розмір скінченних елементів було прийнято для формування остаточної розрахункової сітки в зоні ударної взаємодії. Це дозволило забезпечити компроміс між точністю результатів та обчислювальною ефективністю моделі.

Якість скінчено-елементної сітки контролювалась за показниками форми елементів (співвідношення сторін, кутові викривлення тощо), що забезпечило коректність чисельного розв'язку та його стійкість при моделюванні швидкоплинних динамічних процесів.

Чисельне моделювання процесу ударної взаємодії глиби вантажу з конструкцією люка напіввагона виконувалось із використанням явної схеми інтегрування рівнянь руху в середовищі ANSYS Explicit Dynamics. Застосування даного підходу обумовлено можливістю коректного відтворення швидкоплинних нелінійних процесів, що супроводжуються великими переміщеннями, пластичними деформаціями та складною контактною взаємодією. Контроль коректності розрахунку здійснювався на основі аналізу енергетичного балансу системи.

За результатами чисельного моделювання процесу падіння глиби вантажу на середню частину кришки люка НПВ отримано розподіли напружень і деформацій для різних сценаріїв навантаження, що відрізняються висотою падіння та масою вантажу (рис. 5).

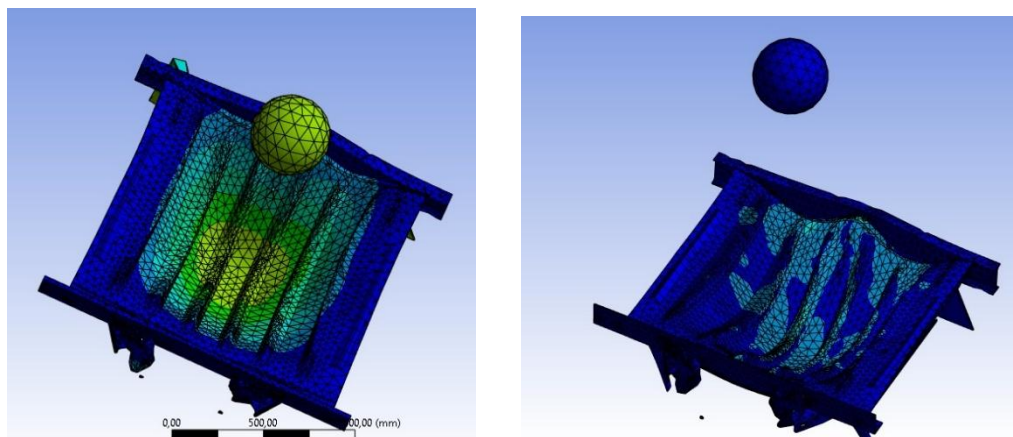


Рис. 5. Розподіл напружено-деформованого стану та деформацій

Аналіз напружено-деформованого стану показав, що характер розподілу еквівалентних напружень є суттєво неоднорідним. Максимальні напруження локалізуються в зоні контакту глиби вантажу з поверхнею люка та в елементах, що забезпечують передавання навантаження до рами вагона.

Найбільш несприятливими є випадки падіння глиби вантажу в зонах підвищеної жорсткості конструкції, зокрема в районі державок та закидок люка. У цих зонах відбувається обмеження деформацій, що призводить до зростання локальних

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

напружень і формування концентрацій.

Зі збільшенням висоти падіння глиби та маси вантажу спостерігається зростання як максимальних напружень, так і величин переміщень конструкції (рис. 6, 7). Залежність носить нелінійний характер, що обумовлено пластичним деформуванням матеріалу та зміною умов контактної взаємодії в процесі удару.

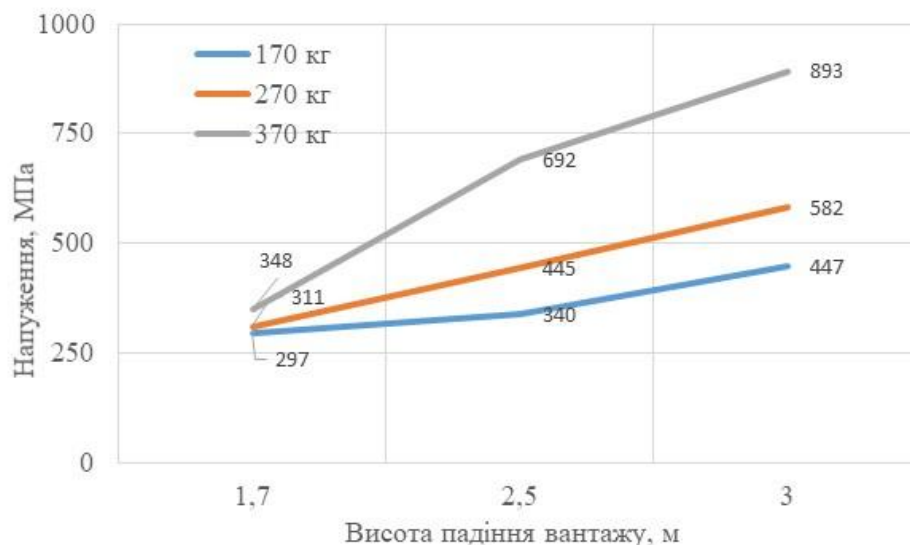


Рис. 6. Залежності зміни максимальних напружень при падінні вантажу в центрі розвантажувального люка

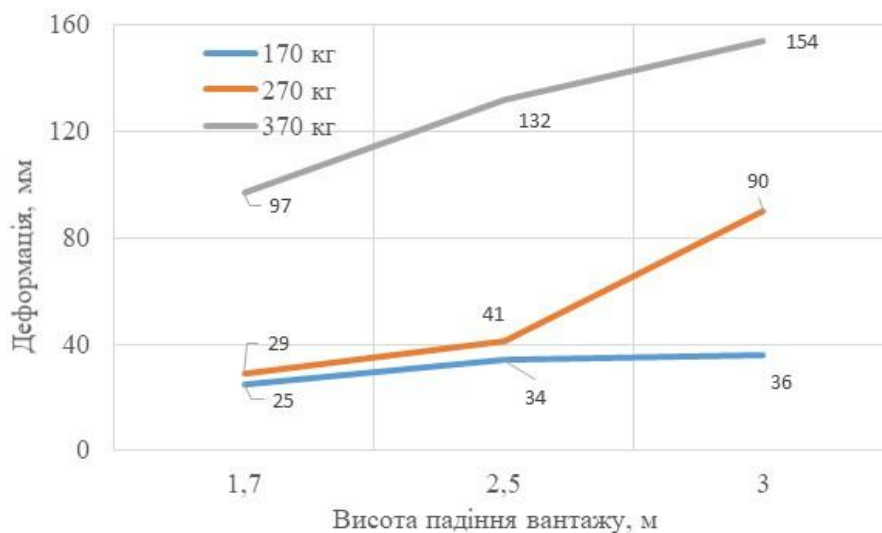


Рис. 7. Залежності зміни максимальних деформацій при падінні вантажу в центрі розвантажувального люка

При висотах падіння понад 2,5–3,0 м у ряді зон фіксується досягнення перевищення межі текучості матеріалу, що свідчить про можливість виникнення залишкових деформацій і пошкоджень конструкції люка в реальних умовах експлуатації.

Максимальні переміщення спостерігаються в центральній частині люка при відповідному сценарії навантаження, що пов'язано з меншою жорсткістю цієї ділянки. У той же час у зонах державок і закидок величини переміщень є меншими, проте саме тут формуються найбільш небезпечні напруження, що можуть призводити до зародження тріщин.

Висновки:

1 Виконано аналіз основних пошкоджень НПВ на шляху прямування та доведено, що саме відмови кузовів викликають переважну більшість відчеплень.

2 Проаналізовано особливості навантаження люків універсальних напіввагонів при падінні глиби вантажу та встановлено, що ударна взаємодія має локальний характер і супроводжується формуванням значних концентрацій напружень у зоні контакту та в елементах кріплення люка.

3 Обґрунтовано доцільність застосування чисельного моделювання в явній динамічній постановці для дослідження процесу ударної взаємодії, що дозволяє врахувати нелінійні ефекти, контактні явища та пластичне деформування матеріалу.

4 Розроблено локалізовану скінчено-елементну модель, яка включає люк, елементи його кріплення та частину рами вагона, при цьому вплив решти конструкції враховано шляхом задання еквівалентних граничних умов.

5 Визначено вплив висоти падіння глиби вантажу у центрі розвантажувального люка на рівень напружень і деформацій. Показано, що зі збільшенням висоти падіння спостерігається нелінійне зростання напружень, а при певних значеннях досягається межа текучості матеріалу, що свідчить про можливість виникнення залишкових деформацій та пошкоджень.

6 Встановлено, що найбільш небезпечними є зони жорсткого закріплення (державки, закидки), де формуються максимальні еквівалентні напруження, тоді як у центральній частині люка переважають значні прогини при відносно нижчих рівнях напружень.

7 Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення конструкції люків напіввагонів, зокрема шляхом підсилення критичних зон або оптимізації геометричних параметрів, що дозволить зменшити рівень пошкоджень при навантаженні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гладких І. В., Сулим А. О., Лупітько Н. В. Основні дослідження динаміки оновлення та розвитку парку вантажних вагонів в Україні. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*. Кременчук: Вид-во ДП «УкрНДІВ». 2020. Вип. 20. С. 4-13.

2. Сулим А. О., Сафронов О. М., Федосов-Никонов Д. В., Стринжа А. М. Сучасний стан та перспективи розвитку парку вантажних вагонів в Україні: оновлення або продовження призначеного строку служби. *Залізничний транспорт України*. 2021. № 4. С. 4-20. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZTU_2021_4_3

3. Заріпов Р. Ю., Сулейменов А. Д., Карімова Ж. Р. Дослідження надійності цілнометалевих напіввагонів (переклад р. м.). *Наука і техніка Казахстану*. 2021. № 4. С. 119-127. DOI: <https://doi.org/10.48081/gqrv7549>

4. Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Шовкун В. О., Литовченко О. М., Дмитренко М. В.,

Балашов О. О. Дослідження технічного стану універсальних напіввагонів. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2023. № 209. С. 66-75. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.209.2024.314256>

5. Федосов-Ніконов Д. В., Стринжа А. М., Шамшей Д. О., Полулях В. М., Федоров В. В., Шушмарченко В. О. Дослідження корозійних пошкоджень елементів вагонів під час технічного діагностування. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля*. 2019. № 3 (251). С. 181–184.

6. Zaripov R., Gavrilovs P. Research Opportunities to Improve Technical and Economic Performance of Freight Car through the Introduction of Lightweight Materials in their Construction. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 187. P. 22-29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.345>

7. Myamlin S. V., Kolesnykov S. R. Design review of gondola car. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*. 2014. № 6 (54). С. 136-145. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2014/33773>

8. Lee W. G., Kim J-S., Sun S-J., Lim J-Y. The next generation material for lightweight railway car body structures: magnesium alloys. *Proc Inst Mech Eng Part F J Rail Rapid Transit*. 2018. Vol. 232. Iss. 1. P. 25-42. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409716646140>

9. Baranovskyi D., Myamlin S., Kebl I. Increasing the Carrying Capacity of the Solid-Body Rail Freight Car. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2022. 16 (3), P. 219-225. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/149935>

10. Baranovskyi D., Bulakh M., Bulakh M. Determining the service life of a gondola car with an increased floor body safety factor. *Reliability Engineering & System Safety*. 2026. Vol. 266. Art. 111670. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111670>

11. Фомін О. В., Горбунов М. І., Коваленко В. В., Флярковська В. О. Формалізовані описання конструкцій кришок люків напіввагонів (частина 2). *Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля*. 2018. № 1 (242). С. 145-152

12. Antipin D. Ya., Racin D. Y., Shorokhov S. G. Justification of a Rational Design of the Pivot Center of the Open-Top Wagon Frame by Means of Computer Simulation. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 150-154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.738>

13. Візняк Р. І., Чепурченко І. В., Луценко А. О. Особливості визначення експлуатаційних навантажень кузова напіввагона та шляхи удосконалення його конструкції з метою забезпечення міцності і збереження. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2016. № 159. С. 91–97. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.159.2016.67018>

14. Минеев С. П., Прусова А. А., Выгодин М. А., Минеев А. С. Основные технологические решения по эффективной разгрузке смерзшегося груза из железнодорожных полувагонов. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. 2012. № 40. С. 124-130.

15. Візняк Р. І. Визначення динамічних сил, що діють на піввагон при розвантаженні роторним вагоноперекидачем. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2023. № 203. С. 35-44. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.203.2023.277952>

16. Візняк Р. І. Вивантаження з залізничних напіввагонів насипних вантажів удосконаленим способом перекидання. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2025. № 212. С. 208-216. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336410>

17. ДСТУ 7598:2014 Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Введено на підставі наказу ДП «УкрНДНЦ» від 02.12.2014 № 1430. Київ, ДП «УкрНДНЦ», 2014. 161 с.

I. E. Martynov

Ukrainian State University of Railway Transport
7 Feuerbach Square, 61050, Kharkiv, Ukraine
Tel.: +380577301035, E-mail: martynov.hiit@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>

A. V. Trufanova

Ukrainian State University of Railway Transport
7 Feuerbach Square, 61050, Kharkiv, Ukraine
Tel.: +380577301035, E-mail: trufanova@kart.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>

V. O. Shovkun

Ukrainian State University of Railway Transport
7 Feuerbach Square, 61050, Kharkiv, Ukraine
Tel.: +380577301035, E-mail: vadimshovkun62@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1826-6053>

M. V. Dmytrenko

Ukrainian State University of Railway Transport
7 Feuerbach Square, 61050, Kharkiv, Ukraine
Tel.: +380577301035, E-mail: lemtr21@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2712-2495>

**ANALYSIS OF THE STRESS AND DEFORMATION STATE OF THE
LIDS OF UNLOADING HATCHES OF GONDOLA CARS DURING
CARGO UNLOADING**

The article presents the results of the analysis of failures and damage to the main components of universal gondolas of various models and manufacturers owned by JSC Ukrzaliznytsia. It was determined that more than 70% of gondola decouplings on the route are caused by damage to the bodies.

An analysis of the causes of damage to all-metal bodies with subsequent unscheduled restoration of operability was performed. The vast majority are malfunctions of hatch covers, cracks and fractures of the frame crossbeams (more than 80% of the total number). The difference in the number of decouplings in different models of gondolas of Ukrainian production is within the statistical error. The main influence on the occurrence of beam cracks and damage to hatches is not the design features of a specific gondola model, but the methods of unloading (use of grabs, etc.). An analysis of the causes of damage to all-metal bodies with subsequent unscheduled restoration of operability was performed. The vast majority are malfunctions of hatch covers, cracks and fractures of the frame crossbeams (more than 80% of the total number). The difference in the number of decouplings in different models of gondolas of Ukrainian production is within the statistical error. The main influence on the occurrence of beam cracks and damage to hatches is not the design features of a specific gondola model, but the methods of unloading (use of grabs, etc.).

Operating experience shows that when dropping cargo from a height, there is an uneven distribution of shock loads on the surface of the hatches. The fall of individual large-sized pieces (lupm) of cargo is especially dangerous, which is accompanied by local overloads that significantly exceed the calculated static values. As a result, plastic deformations, dents, cracks in the area of welded joints, as well as premature destruction of hatch structural elements occur.

In order to study the stress-strain state of the gondola hatch structure under impact load, numerical modeling was used in the work. The geometric model of the universal gondola body and cargo was developed in the ANSYS environment. To improve computational efficiency, an approach based on localization of the calculation domain was applied. Numerical simulation of the impact interaction between a cargo lump and the

hatch structure was carried out using an explicit time integration scheme for the equations of motion.

According to the results of numerical modeling of the process of falling of the cargo lump onto the hatch of a gondola car, the distribution of stresses and strains was obtained for various loading scenarios, which differ in the height of the fall and the area of impact application.

Analysis of the stress-strain state showed that the nature of the distribution of equivalent stresses is significantly heterogeneous and depends both on the geometry of the structure and on the place of application of the impact load. The maximum stresses are localized in the area of contact of the cargo lump with the hatch surface and in the elements that ensure the transfer of the load to the car frame.

Keywords: universal gondola car, body, frame, hatch cover, cross beam, pillar, body skin, crack, fracture.

REFERENCES

1. Gladkikh, I. V., Sulym, A. O., & Lupitko, N. V. (2020) Osnovni doslidzhennya dynamiky onovlennya ta rozvytku parku vantazhnykh vahoniv v Ukraini [Basic research on the dynamics of renewal and development of the freight car fleet in Ukraine]. *Zbirnyk naukovykh prats' «Reykovyy rukhomyy sklad» – Collection of scientific papers «Railbound rolling stock»*, Kremenchuk: Vyd-vo DP «UkrNDIV», 20, 4-13 [in Ukrainian].
2. Sulym, A. O., Safronov, O. M., Fedosov-Nykonov, D. V., & Strynzha, A. M. (2021) Suchasnyy stan ta perspektyvy rozvytku parku vantazhnykh vahoniv v Ukraini: onovlennya abo prodovzhennya pryznachenoho stroku sluzhby [Current state and prospects for the development of the freight car fleet in Ukraine: renewal or extension of the designated service life]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway transport of Ukraine*, 4, 4-20
3. Zaripov, R. Yu., Suleymenov, A. D., & Karimova, Z. R. (2021) Issledovaniye nadezhnosti tsel'nometallicheskiykh poluvagonov [Study of the reliability of all-metal gondola cars]. *Nauka i tekhnika Kazakhstana – Science and technology of Kazakhstan*, 4, 119–127
4. Martynov, I. E., Shovkun, V. O., Trufanova, A. V., Lytovchenko, O. M., Dmytrenko M. V. & Balashov, O. O. (2023) Doslidzhennya tekhnichnoho stanu universal'nykh napivvahoniv [Research of technical condition of universal gondola cars]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho Derzhavnoho Universytetu Zaliznychnoho Transportu – Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 209, 6-75 [in Ukrainian].
5. Fedosov-Nikonov, D. V., Strynzha, A. M., Shamshey, D. O., Poluliakh, V. M., Fedorov, V. V., & Shushmarchenko, V. O. (2019) Doslidzhennya korozivnykh poshkodzen' elementiv vahoniv pid chas tekhnichnoho diahnostuvannya [Investigation of corrosion damage to wagon elements during technical diagnostics]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia – Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 3 (251), 181–184 [in Ukrainian].
6. Zaripov, R. & Gavriloys, P. (2017) Research Opportunities to Improve Technical and Economic Performance of Freight Car through the Introduction of Lightweight Materials in their Construction. *Procedia Engineering*, 187, 22-29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.345> [in English].
7. Myamlin, S. V. & Kolesnykov, S. R. (2014) Design review of gondola car. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, № 6 (54). 136-145. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2014/33773> [in English].
8. Lee, W. G., Kim, J-S., Sun, J-Y., & Lim, J-Y. (2018) The next generation material for lightweight railway car body structures: magnesium alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F J Rail Rapid Transit*, 232 (1), 25-42. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409716646140> [in English].
9. Baranovskyi, D., Myamlin, S., & Kebl I. (2022) Increasing the Carrying Capacity of the Solid-Body Rail Freight Car. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 16 (3), 219-225. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/149935> [in English].
10. Baranovskyi, D., Bulakh, M., Bulakh, M. (2026) Determining the service life of a gondola car with an increased floor body safety factor. *Reliability Engineering & System Safety*, 266, Art. 111670. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111670> [in English].
11. Fomin, O. V., Horbunov, M. I., Kovalenko, V. V., & Flyarkovs'ka, V. O. (2018) Formalizovani

opysannya konstruktsiy kryshok lyukiv napivvohoniv (chastyna 2) [Formalized descriptions of the structures of hatch covers of gondola cars (part 2)]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia – Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 1 (242), 145-152 [in Ukrainian].

12. Antipin, D. Ya., Racin, D. Y., & Shorokhov, S. G. (2016) Justification of a Rational Design of the Pivot Center of the Open-Top Wagon Frame by Means of Computer Simulation. *Procedia Engineering*, 150, 150-154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.738> [in English].

13. Viznyak, R. I., Chepurchenko, I. V., & Lutsenko, A. O. (2016) Osoblyvosti vyznachennya ekspluatatsiynykh navantazhen' kuzova napivvahona ta shlyakhy udoskonalennya yoho konstruktsiyi z metoyu zabezpechennya mitsnosti i zberezhennta [Features of determining the operational loads of a gondola body and ways to improve its design to ensure strength and safety]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho Derzhavnoho Universytetu Zaliznychnoho Transportu – Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 159, 91–97. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.159.2016.67018> [in Ukrainian].

14. Mineev, S. P., Prusova, A. A., Vygodin, M. A., & Mineev, A. S. (2012) Osnovnyye tekhnologicheskiye resheniya po effektivnoy razgruzke merzshogo syagruza iz zheleznodorozhnykh poluvagonov [Key technological solutions for efficient unloading of frozen cargo from railway gondola cars]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana – Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 40, 124-130

15. Viznyak, R. I. (2023) Vyznachennia dynamichnykh syl, shcho diut na pivvahon pry rozvantazhenni rotornym vahonoperekydachem. [Determination of dynamic forces acting on a gondola car during unloading by a rotary tipper]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho Derzhavnoho Universytetu Zaliznychnoho Transportu – Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 203, 35-44. Retrieved from: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2023/04/tht_zbirn_203_2023.pdf [in Ukrainian].

16. Viznyak, R. I. (2025) Vyvantazhennya z zaliznychnykh napivvohoniv nasypanykh vantazhiv udoskonalenyim sposobom perekydannya [Unloading bulk cargo from railway gondolas using an improved tipping method]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho Derzhavnoho Universytetu Zaliznychnoho Transportu – Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 212, 208-216. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336410> [in Ukrainian].

17. Vahony vantazhni. Zahalni vymohy do rozrakhunkiv ta proektuvannia novykh i modernizovanykh vahoniv kolii 1520 mm (nesamokhidnykh) [Freight cars. General requirements for the calculation and design of new and modernized 1520 mm gauge cars (non-self-propelled)]. (2014). DSTU 7598:2014 from 2nd December 2014. Kyiv: SE «UkrNDNTs» [in Ukrainian].



Стаття надійшла 27.04.2026
Стаття прийнята 30.04.2026
Опубліковано 29.05.2026

Ж. О. Семко

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Тел.: +380536660250, E-mail: shaganne@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0047-8509>

АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТІВ ПІД ЧАС ЗДІЙСНЕННЯ ОЦІНКИ ВІДПОВІДНОСТІ У СФЕРІ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

У сфері залізничного транспорту відбудеться подія, терміни настання якої відклалися два рази відповідно до Постанов Кабінету Міністрів України від 13 червня 2024 р. № 692 та від 04 квітня 2025 р. № 377. Ця подія стосується чинності Постанови КМУ від 26 січня 2022 р. № 53 Пров несення змін до Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту і Технічного регламенту безпеки рухомого складу залізничного транспорту, яку можна було б назвати довгоочікуваною, якщо б у сфері стандартизації не відбулось тотальне скасування національних стандартів, прийнятих на основі міждержавних, які прямо або опосередковано стосуються залізничного транспорту.

Незаперечливим в цьому сенсі є факт встановлення Законом України Про технічні регламенти та оцінку відповідності положення про надання презумпції відповідності продукції вимогам певного технічного регламенту через застосування національного стандарту із переліку національних стандартів для цілей застосування відповідного технічного регламенту (частина 1 статті 111).

Отже постає питання: якщо скасовано більшість національних стандартів, що входили до переліків національних стандартів для цілей застосування технічних регламентів у сфері залізничного транспорту, яким чином здійснювати оцінку відповідності продукції та, особливо, яким чином отримати докази презумпції відповідності?

Законодавчою системою технічного регулювання в Україні передбачено, що «надання на ринку України, введення в обіг чи в експлуатацію продукції має бути направлені насамперед на захист життя та здоров'я людей, тварин і рослин, охорону довкілля та природних ресурсів, забезпечення енергоефективності, захист майна, забезпечення національної безпеки та запобігання підприємницькій практиці, що вводить споживача (користувача) в оману».

Таким чином, згідно з положеннями цього закону, які поширюються на усю продукцію, що надається на ринку України, ураховуючи настання терміну чинності Постанови КМУ від 26.01.2022 № 53, здійснення оцінки відповідності продукції для потреб залізничного транспорту вимогам технічних регламентів стає законодавчо обґрунтованим та обов'язковим.

© Семко Ж. О., 2026

В статті наведено огляд нормативно-правових актів, положеннями яких встановлюється відповідальність, зокрема юридична, щодо застосування (або незастосування) національних стандартів. Також в статті проведено аналіз можливості здійснення оцінки відповідності вимогам технічного регламенту без використання національного стандарту із переліку національних стандартів для цілей застосування технічних регламентів у сфері залізничного транспорту.

Ключові слова: національний стандарт, технічний регламент, оцінка відповідності, задані вимоги, презумпція відповідності.

Вступ

Частиною третьою статті 11 Закону України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» [1] встановлено:

«Відповідність продукції вимогам технічних регламентів може бути забезпечена шляхом застосування національних стандартів та/або інших технічних специфікацій, посилання на які містяться у відповідних технічних регламентах. У технічному регламенті зазначається, чи відповідність продукції таким національним стандартам та/або іншим технічним специфікаціям є єдиним способом, чи одним із способів задоволення вимог цього технічного регламенту.

Посилання в технічних регламентах на зазначені національні стандарти можуть мати форму переліків національних стандартів для цілей застосування відповідних технічних регламентів».

У сфері залізничного транспорту відповідні переліки національних стандартів для цілей застосування технічних регламентів затверджені наказами Міністерства розвитку громад та територій України:

1) № 60 від 31.01.2022 Про затвердження Переліку національних стандартів для цілей застосування Технічного регламенту безпеки рухомого складу залізничного транспорту [2];

2) № 69 від 03.02.2022 Про затвердження Переліку національних стандартів для цілей застосування Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту [3].

Треба зауважити, що проблема застосування національних стандартів із переліків [2] та [3], її актуальність на даний час полягають в тому, що відповідно до наказів Національного органу стандартизації (виконання функцій якого покладено на ДП «Український науково-дослідний та навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості») більшість стандартів скасовано.

Отже, постає питання щодо встановлення презумпції відповідності продукції вимогам технічних регламентів на підставі відповідності вимогам національного (національних) стандарту (стандартів) із переліків [2] та [3], якщо національні стандарти, що входять до цих переліків, не є чинними.

Мета роботи полягає у визначенні правових аспектів щодо відповідальності виробників, уповноважених представників, імпортерів та розповсюджувачів, зокрема юридичної, стосовно застосування або незастосування національних стандартів під час виготовлення, введення в обіг або експлуатацію, надання на ринку продукції, яка підлягає оцінці відповідності згідно з законом [1]. Крім того, метою цієї статті є спроба проаналізувати можливість здійснення оцінки відповідності вимогам технічного регламенту без використання національного стандарту із переліку національ-

них стандартів для цілей застосування технічних регламентів у сфері залізничного транспорту [4] та [5].

Матеріали та методи дослідження

Слід зазначити, що дослідження щодо впровадження системи технічного регулювання в Україні проводились різними авторами стосовно як харчової так й нехарчової продукції, починаючи з 2010 року, як тільки було розпочато роботу зі створення Технічного регламенту безпеки машин та механізмів. Але поширення для вивчення та досліджень ця тема набула після ратифікації Україною Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони [6] (Угоду ратифіковано із заявою Законом № 1678-VII від 16.09.2014).

У статті Карпа М. «Реформування національної системи стандартизації України у контексті євроінтеграції: Динаміка розвитку та перспективи» [7] розглянуті нормативні, організаційні та інституційні зміни, які супроводжують гармонізацію технічного регулювання з правом ЄС, а також висвітлюються ключові виклики, що постають у процесі адаптації європейських стандартів, директив та процедур оцінки відповідності. У роботі обґрунтовується необхідність забезпечення прозорості у сфері технічного регулювання, імплементації гармонізованих стандартів та впровадження європейської моделі New Legislative Framework (NLF), що визначає обов'язкові вимоги безпеки продукції та структурує процедури оцінки відповідності.

Також в статті наведено пояснення щодо моделі New Legislative Framework (переклад англ. – нова законодавча база), яка діє в ЄС, при якій директиви встановлюють обов'язкові вимоги безпеки, а стандарти пропонують технічні рішення для їх виконання (використання стандартів добровільне, але рекомендоване).

«New Legislative Framework – це нормативно-правова система Європейського Союзу, яка визначає:

- уніфіковані юридичні правила регулювання продукції на внутрішньому ринку ЄС і включає гармонізовані вимоги безпеки та якості, обов'язкові для дотримання перед введенням продукції в обіг;

- встановлює юридичну відповідальність виробників, імпортерів, розповсюджувачів та уповноважених представників за відповідність, простежуваність і реагування на ризики;

- визначає процедури оцінки відповідності через модулі А–Н залежно від виду продукції та рівня ризику; регулює створення, акредитацію та відповідальність нотифікованих органів і нагляд держав-членів за їх діяльністю;

- встановлює юридичні правила застосування маркування СЕ як підтвердження відповідності вимогам законодавства та права на вільний обіг;

- визначає механізми державного ринкового нагляду та обов'язки компетентних органів щодо виявлення, вилучення чи відкликання небезпечної або невідповідної продукції;

- забезпечує захист споживачів, охорону здоров'я, довкілля та реалізацію принципу превентивності, формуючи цілісну й обов'язкову нормативну систему, що гарантує безпечне та якісне функціонування продукції на ринку ЄС [8]».

Гамбург І. А. у статті «Євроінтеграційний вектор розвитку законодавства України про технічне регулювання: Проблеми та перспективи» [9] досліджує сучасний стан та перспективи розвитку законодавства України про технічне регулювання; визначає, що національне законодавство у сфері технічного регулювання має базуватися на Угоді про технічні бар'єри в торгівлі, Угоді про застосування санітарних

та фітосанітарних заходів, положеннях «Нового» та «Глобального» підходів щодо стандартизації та сертифікації, прийнятими у ЄС; проводить аналіз сучасного стану законодавства України про технічне регулювання, наводить конкретні приклади неузгодженості між нормами, паралелізму при вирішенні однопорядкових питань у нормативно-правових актах, прогалин у правовому регулюванні відповідних відносин.

Печиліна О. В. у статті «Питання гармонізації вітчизняної нормативно-правової бази в галузі стандартизації та технічного регулювання відповідно до вимог Європейського Союзу» [10] аналізує актуальні проблеми та тенденції щодо гармонізації законодавства України до вимог Європейського союзу у сфері технічного регулювання. Також автор приводить пояснення щодо встановленого Законом України Про стандартизацію [11] положення про застосування стандартів на добровільній основі, але за виключенням продукції, щодо якої обов'язковість застосування стандартів встановлена нормативно-правовими актами. До цієї продукції віднесено: будівельні вироби, нафтопродукти, вогнепальну зброю, засоби самозахисту, охоронні системи, продукцію протипожежного призначення, радіаційну техніку, електричний транспорт та тютюнові вироби.

Крім того, автор нагадує, що у 2018-2019 р. р. було видано «низку наказів щодо відновлення дії міждержавних стандартів, прийнятих як національні, розроблених до 1992 року (ГОСТ) з терміном дії до 01.01.2020, 01.01.2021, 01.01.2022. Зокрема це стандарти:

- на заміну яких проводиться або передбачається розроблення проектів національних стандартів;
- посилання на які є в нормативно-правових актах;
- які застосовуються в різних сферах діяльності;
- стосовно Єдиної системи конструкторської документації;
- розроблені на основі міжнародних стандартів, версії яких є актуальними та які відповідно до пункту 2 розділу VI «Прикінцеві та перехідні положення» Закону застосовуються як національні стандарти».

До цього слід додати, що свого часу департаментом технічного регулювання Мінекономрозвитку було надано Роз'яснення Міністерства економічного розвитку і торгівлі України з питань застосування стандартів, у тому числі в зв'язку зі скасуванням у 2015 році міждержавних стандартів (ГОСТ) [12], яке зокрема має такі висновки:

- за умови добровільності застосування стандарту, але з метою мати будь-які інструкцію, правила тощо, які впорядковують діяльність у той чи іншій сфері, може застосовуватися не чинний ГОСТ (національний стандарт), якщо на нього не передбачається робити посилання у відповідній сфері діяльності;
- виробники можуть застосовувати скасовані ГОСТ у своїй господарській діяльності та для своїх професійних потреб як звичайні інструкцію, правила тощо, але не можуть робити посилання на такі ГОСТ, тому що вони не є чинними та не визнані національними органом стандартизації;
- відповідно до частини першої та другої статті 13 Закону України «Про захист прав споживачів» виключено обов'язкову норму, яка стосується того, що інформація про продукцію повинна містити найменування нормативних документів, вимогам яких повинна відповідати вітчизняна продукція.

Отже, виникає перша правова неузгодженість – виробники можуть застосовувати нечинний стандарт, але посилаючись на нього у відповідній сфері діяльності не мають підстав. Тобто виробник має заздалегідь підготувати докази, щоб у разі потреби до-

вести, наприклад, органам державного ринкового нагляду, що його продукція є безпечною та відповідає суттєвим вимогам відповідного технічного регламенту.

Наразі доречно нагадати положення абзацу другого частини першої статті 111 закону [1], а саме:

«Виробники мають право приймати інші рішення для задоволення суттєвих вимог технічного регламенту, крім застосування стандартів з переліку національних стандартів для цілей застосування технічного регламенту.»

Але водночас це твердження накладає на виробника вирішення дуже складної задачі, за умовами якої потрібно знайти відповіді на низку питань:

1) саме якими методами чи способами має бути доведено відповідність суттєвим вимогам?

2) на підставі яких документів та результатів яких випробувань може бути доведено безпечність продукції?

3) чи задовільнять вжиті заходи органи державного ринкового нагляду для отримання позитивного рішення?

На першій погляд на ці питання можуть відповісти положення частин першої, третьої, четвертої статті 5 Закону України Про загальну безпечність нехарчової продукції [13], а саме:

«1. Продукція вважається безпечною, якщо вона відповідає вимогам щодо забезпечення безпечності продукції, встановленим законодавством.

3. Доказом безпечності продукції є її відповідність національним стандартам, що гармонізовані з відповідними європейськими стандартами.

4. У разі відсутності вимог щодо забезпечення безпечності продукції, визначених частиною першою цієї статті, або за відсутності чи незастосуванні національних стандартів, визначених частиною третьою цієї статті, орган державного ринкового нагляду під час доведення того, що продукція є небезпечною, може враховувати в такій послідовності:

1) національні стандарти інших держав щодо забезпечення безпечності продукції, гармонізовані з відповідними європейськими та міжнародними стандартами;

2) регіональні стандарти щодо забезпечення безпечності продукції відповідно до міжнародних договорів України;

3) стандарти України щодо забезпечення безпечності продукції, крім визначених частиною третьою цієї статті;

4) кодекси усталеної практики із забезпечення безпечності продукції у відповідних галузях;

5) досягнення науки і техніки у сфері безпечності продукції;

6) очікування споживачів (користувачів) щодо безпечності продукції за звичайних або обґрунтовано передбачуваних умов її використання (у тому числі щодо строку служби та за необхідності введення в експлуатацію вимог стосовно встановлення і технічного обслуговування).

Як бачимо, самий легкий шлях доведення безпечності продукції – це її відповідність національним стандартам, гармонізованим з європейськими, або національним стандартам інших держав, або регіональним стандартам, або національним стандартам України.

Інший законодавчий документ, Господарський кодекс [14], який на даний час втратив чинність, містив такі положення:

«Стаття 15. Технічне регулювання у сфері господарювання

1. У сфері господарювання застосовуються технічні регламенти, стандарти, кодекси ustalеної практики та технічні умови.

2. Застосування стандартів, кодексів ustalеної практики чи їх окремих положень є обов'язковим для:

суб'єктів господарювання, якщо обов'язковість застосування стандартів чи кодексів ustalеної практики установлено нормативно-правовими актами;

учасників угоди (контракту) щодо розроблення, виготовлення чи постачання продукції, якщо в ній (ньому) є посилання на певні стандарти чи кодекси ustalеної практики;

виробника чи постачальника продукції, якщо він склав декларацію про відповідність продукції певним стандартам чи застосував позначення цих стандартів у її маркуванні.

Стаття 268. Якість товарів, що поставляються

1. Якість товарів, що поставляються, повинна відповідати стандартам, технічним умовам (у разі наявності), іншій технічній документації, яка встановлює вимоги до їх якості, або зразкам (еталонам), якщо сторони не визначають у договорі більш високі вимоги до якості товарів.»

І знов найпростішим способом визначення безпечності та/або якості продукції є її відповідність вимогам стандартів, кодексів ustalеної практики або технічним умовам.

Якщо взяти до уваги, що оцінка відповідності продукції може бути проведена виробником (перша сторона), споживачем чи користувачем (друга сторона) та органом з оцінки відповідності (третя незалежна сторона), то треба також звернути увагу на положення Закону України Про захист прав споживачів [15], якими встановлено таке:

«Стаття 6. Право споживача на належну якість продукції

1. Продавець (виробник, виконавець) зобов'язаний передати споживачеві продукцію належної якості, а також надати інформацію про цю продукцію.

2. Продавець (виробник, виконавець) на вимогу споживача зобов'язаний надати йому документи, які підтверджують належну якість продукції.

3. Вимоги до продукції щодо її безпеки для життя, здоров'я і майна споживачів, а також навколишнього природного середовища встановлюються нормативно-правовими актами, в тому числі технічними регламентами.»

Стаття 19. Заборона нечесної підприємницької практики

2. Підприємницька практика вважається такою, що вводить в оману, якщо вона спонукає або може спонукати споживача дати згоду на здійснення правочину, на який в іншому випадку він не погодився б, шляхом надання йому неправдивої чи неповної інформації або ненадання інформації про:

1) основні характеристики продукції, такі як: її наявність, переваги, небезпека, склад, методи використання, метод і дата виготовлення або надання, поставка, кількість, специфікація, географічне або інше походження, очікувані результати споживання чи результати та основні характеристики тестів або перевірок товару».

Таким чином, одним із способів, за яким може бути визначено кількісні, якісні та інші характеристики і ознаки, у тому числі щодо довговічності, функціональності, інтероперабельності або сумісності і безпечності, яким має відповідати продукція – це наведення таких вимог у нормативно-правових актах, в тому числі технічних регламентах, відповідно до закону [1] у національних стандартах, що містяться у відповідних переліках.

У сенсі визначення кількісних, якісних та інших характеристик і ознак, у тому числі щодо довговічності, функціональності, інтероперабельності або сумісності цифрового вмісту і безпеки, слід зазначити, що законом [1] передбачено таке визначення терміну «технічний регламент» – це:

«нормативно-правовий акт, в якому визначено характеристики продукції або пов'язані з ними процеси та методи виробництва, включаючи відповідні адміністративні положення, додержання яких є обов'язковим. Він може також включати або виключно стосуватися вимог до термінології, позначень, пакування, маркування чи етикетування в тій мірі, в якій вони застосовуються до продукції, процесу або методу виробництва». Але в цьому визначенні не йдеться мова про кількісні та якісні характеристики чи ознаки. В технічних регламентах наводяться загальні вимоги щодо характеристик продукції чи пов'язаних процесів та методів виробництва.

Отже, є підстави вважати, що конкретні значення кількісних, якісних та інших характеристик і ознак продукції мають бути наведені у нормативних документах, що передбачені законом [11].

Буде доречно нагадати, що відповідно до закону [11] термін «нормативний документ» визначено як «документ, що встановлює правила, настанови чи характеристики щодо діяльності або її результатів» та відповідно до частини першої статті 6 цього закону встановлено, що нормативними документами є:

«1) національні стандарти та кодекси усталеної практики, прийняті національним органом стандартизації;

2) стандарти, кодекси усталеної практики та технічні умови, прийняті підприємствами, установами та організаціями, що здійснюють стандартизацію».

Таким чином, скасовані відповідно до наказів НОС (ДП «УкрНДНЦ») національні стандарти, (зокрема ті, що стосуються залізничного транспорту) втрачають статус нормативного документу у розмінні закону Про стандартизацію.

У сенсі вище наведеного та, якщо визнати, що:

1) відповідно до частини другої статті 23 закону [11] «національні стандарти та кодекси усталеної практики застосовуються на добровільній основі, крім випадків, якщо обов'язковість їх застосування встановлена нормативно-правовими актами»;

2) технічні регламенти [4] та [5] у сфері залізничного транспорту є нормативно-правовими актами;

3) постанова КМУ від 26.01.2022 № 53 [16] щодо внесення змін до технічних регламентів містить вимогу, що «відповідність рухомого складу залізничного транспорту» (пункт 31 [4]) або складових «елементів інфраструктури залізничного транспорту» (пункт 26 [5]), «пов'язаних з ними процесів або методів виробництва вимогам цього Технічного регламенту забезпечується шляхом застосування національних стандартів, включених до переліку національних стандартів для цілей застосування цього Технічного регламенту»,

то чи можна накази [2] та [3] щодо затвердження переліків національних стандартів для цілей застосування технічних регламентів у сфері залізничного транспорту вважати такими, що мають статус нормативно-правових або підзаконних нормативно-правових актів та встановлюють обов'язкове застосування національних стандартів, що в них зазначені?

На погляд автора цієї статті відповідь на це питання треба шукати у визначенні термінів «нормативно-правовий акт» та «підзаконний нормативно-правовий акт».

Ці терміни визначені Законом України Про правотворчу діяльність [17] таким чином:

«Нормативно-правовий акт – це офіційний документ, прийнятий (виданий) суб'єктом правотворчої діяльності в установленому Конституцією України та (або) законом порядку у письмовій формі (крім випадків, визначених частиною другою статті 47 цього Закону), який містить норму (норми) права і розрахований на неодноразову реалізацію» (частина друга статті 8);

«Підзаконний нормативно-правовий акт – це акт, прийнятий (виданий) суб'єктом правотворчої діяльності на основі та на виконання Конституції України, законів, чинних міжнародних договорів України та спрямований на їх реалізацію.

Підзаконні нормативно-правові акти мають відповідати Конституції України, законам, чинним міжнародним договорам України, підзаконним нормативно-правовим актам вищої юридичної сили та узгоджуватися між собою» (частина перша статті 17).

Таким чином, накази [2] та [3] вважати нормативно-правовими актами або підзаконними нормативно-правовими актами не має підстав. Отже, обов'язковість застосування національних стандартів, що наведені в переліках, затверджених наказами [2] та [3] вважати такою, що встановлена нормативно-правовими актами, можна поставити під сумнів.

Але до підзаконних нормативно-правових актів згідно із підпунктом в) пункту 3) частини другої статті 9 закону [16] віднесено «постанови Кабінету Міністрів України, що містять норми права».

Отже, звертаючись до пунктів 31 технічного регламенту [4] та пункту 26 технічного регламенту [5], які затверджено постановами КМУ та відповідно мають статус підзаконного нормативно-правового акту, можна припустити, що обов'язковість застосування національних стандартів, що наведені в переліках, затверджених наказами [2] та [3], є доведеною.

Підсумовуючи вище наведене, ураховуючи положення щодо презумпції відповідності продукції та пов'язаних з нею процесів (відповідно до абзацу першого частини першої статті 111 закону [1]), можна констатувати правову неузгодженість у вирішенні питання: чи буде правомірною презумпція відповідності продукції вимогам національних стандартів із переліків, затверджених наказами [2] та [3], за умови втрати ними чинності з наказами НОС, для встановлення відповідності вимогам технічних регламентів [4] та [5]?

Висновки.

1. Перша правова неузгодженість – виробники можуть застосовувати нечинні стандарти як інструкції, правила, методики тощо, але посилаючись на них у відповідній сфері діяльності не мають а ні права, а ні підстав.

2. Друга правова неузгодженість – переліки національних стандартів для цілей застосування технічних регламентів у сфері залізничного транспорту мають національні стандарти, які втратили чинність згідно з відповідними наказами НОС, тобто втрачають статус національних стандартів. Але при цьому на ці переліки є посилення у самих технічних регламентах, які відповідно до Закону України Про правотворчу діяльність мають статус підзаконних нормативно-правових актів, що в свою чергу відповідно до Закону України Про технічні регламенти та оцінку відповідності робить застосування національних стандартів з цих переліків обов'язковим.

3. Право виробників приймати інші рішення для задоволення суттєвих вимог відповідного технічного регламенту, крім застосування стандартів з переліку національних стандартів для цілей застосування технічного регламенту, з однієї сторони

– розширює коло можливостей у досягненні мети щодо задоволення суттєвих вимог технічного регламенту, з іншої – ускладнює доказову базу щодо дійсно ефективного задоволення цих суттєвих вимог у забезпеченні безпечності продукції

4. Презумпція відповідності продукції вимогам певного технічного регламенту на підставі відповідності національному стандарту із переліку національних стандартів для цілей застосування відповідного технічного регламенту у разі втрати чинності цим національним стандартом, за певних умов може бути визнана не підтвердженою.

ЛІТЕРАТУРА

1 Закон України Про технічні регламенти та оцінку відповідності від 15 січня 2015 р. № 124-VIII // База даних «Законодавство України»/ВР України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/124-19#Text>

2 Наказ Міністерства інфраструктури України від 30 січня 2022 року № 60 Про затвердження Переліку національних стандартів для цілей застосування Технічного регламенту безпеки рухомого складу залізничного транспорту [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://mindev.gov.ua/storage/app/imported_content/66bb57b765d98.pdf

3 Наказ Міністерства інфраструктури України від 03 лютого 2022 року № 69 Про затвердження Переліку національних стандартів для цілей застосування Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://mindev.gov.ua/storage/app/imported_content/66bb57bcc678f.pdf

4 Про затвердження Технічного регламенту безпеки рухомого складу залізничного транспорту: Постанова Кабінету Міністрів України від 30 грудня 2015 р. № 1194 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1194-2015-%D0%BF#Text>

5 Про затвердження Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту: Постанова Кабінету Міністрів України від 11 липня 2013 р. № 494 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/494-2013-%D0%BF#Text>

6 Угода про асоціацію між Україною з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони (Угоду ратифіковано із заявою Законом № 1678-VII від 16.09.2014) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text

7 Карпа М. Реформування національної системи стандартизації України у контексті євроінтеграції: Динаміка розвитку та перспективи. *Збірник наукових праць «Публічне управління: концепції, парадигма, розвиток, удосконалення»*. 2025. № 14. С. 34-43 DOI: <https://doi.org/10.31470/2786-6246-2025-14-34-43>

8. EU: Product legislation – revision of the New Legislative Framework (NLF). An official website of the European Union. / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://single-market-economy.ec.europa.eu/single-market/goods/new-legislative-framework_en (дата звернення: 12.09.2025).

9 Гамбург І.А. Євроінтеграційний вектор розвитку законодавства України про технічне регулювання: Проблеми та перспективи. *Молодий вчений*. 2017. № 4(44). С. 286-288 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://molodyvcheny.in.ua/files/journal/2017/4/67.pdf>

10 Печиліна О. В. Питання гармонізації вітчизняної нормативно-правової бази в галузі стандартизації та технічного регулювання відповідно до вимог Європейського Союзу. *Актуальні проблеми вітчизняної юриспруденції. Спецвипуск*. 2019. С. 61-64 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://apnl.dnu.in.ua/2019/18.pdf>

11 Закон України Про стандартизацію від 5 червня 2014 року № 1315-VII// База даних «Законодавство України»/ВР України (Відомості Верховної Ради (ВВР), 2014, № 1315, ст. 1058) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1315-18#Text>

12 Роз'яснення Міністерства економічного розвитку і торгівлі України з питань застосування стандартів, у тому числі в зв'язку зі скасуванням у 2015 році міждержавних стандартів (ГОСТ) 19.04.2016 Департамент технічного регулювання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=964dd5be-37b3-4738-ab45-2e7ca4677167&title=Roziasnennia%20MinisterstvaEkonomichnogoRozvitkuITorgivliUkrainiZPitanZastosuvanniaStandartivUTomuChisliVZviazkuZiSkasuvanniamU2015-RotsiMizhderzhavnikhStandartiv>

13 Закон України Про загальну безпечність нехарчової продукції від 2 грудня 2010 року № 2736-VI // База даних «Законодавство України» / ВР України (Відомості Верховної Ради України (ВВР),

2011, № 22, ст. 145) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2736-17#Text>

14 Господарський кодекс України від 16 січня 2003 року № 436-IV // База даних «Законодавство України» / ВР України (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2003, № 18, № 19-20, № 21-22, ст. 144) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/436-15#Text>

15 Закон України Про захист прав споживачів від 12 травня 1991 року № 1023-XII // База даних «Законодавство України» / ВР України (Відомості Верховної Ради УРСР (ВВР), 1991, № 30, ст. 379) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1023-12#Text>

16 Про внесення змін до Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту і Технічного регламенту безпеки рухомого складу залізничного транспорту. Постанова Кабінету Міністрів України від 26 січня 2022 р. № 53 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/53-2022-%D0%BF#Text>

17 Закон України Про правотворчу діяльність від 24 серпня 2023 року № 3354-IV // База даних «Законодавство України» / ВР України (Відомості Верховної Ради (ВВР), 2023, № 93, ст. 364) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3354-20#Text>

Z. O. Semko

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»

33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine

Tel.: +380 536(6) 60250, E-mail: shaganne@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0047-8509>

CURRENT ISSUES REGARDING THE APPLICATION OF REGULATORY DOCUMENTS DURING CONFORMITY ASSESSMENT IN THE FIELD OF RAILWAY TRANSPORT

In the field of railway transport, an event is about to take place, the effective date of which was postponed twice in accordance with the Resolutions of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated June 13, 2024, No. 692, and April 4, 2025, No. 377. This event concerns the entry into force of Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated January 26, 2022, No. 53 on Amendments to the Technical Regulation on the Safety of Railway Transport Infrastructure and the Technical Regulation on the Safety of Railway Rolling Stock. It could have been described as long-awaited, had the field of standardization not experienced the total cancellation of national standards adopted on the basis of interstate standards, which directly or indirectly relate to railway transport.

An indisputable fact in this regard is the provision established by the Law of Ukraine On Technical Regulations and Conformity Assessment concerning the granting of a presumption of conformity of products with the requirements of a specific technical regulation through the application of a national standard included in the list of national standards for the purposes of applying the relevant technical regulation (Part 1 of Article 111).

Therefore, the following question arises: if most national standards included in the lists of national standards for the purposes of applying technical regulations in the field of railway transport have been repealed, how should product conformity assessment be carried out and, in particular, how can evidence of the presumption of conformity be obtained?

The legislative system of technical regulation in Ukraine provides that «the making available on the market of Ukraine, placing on the market, or putting into service of products shall primarily be aimed at protecting the life and health of humans, animals and plants, environmental and natural resource protection, ensuring energy efficiency, protection of property, ensuring national security, and preventing business practices that mislead the consumer (user).»

Thus, according to the provisions of this Law, which apply to all products made available on the market of Ukraine, taking into account the effective date of Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated January 26, 2022, No. 53, carrying out conformity assessment of products intended for railway transport with the requirements of technical regulations becomes legally justified and mandatory.

The article provides a review of regulatory legal acts whose provisions establish liability, including legal liability, regarding the application (or non-application) of national standards. The article also analyzes the possibility of carrying out conformity assessment with the requirements of a technical regulation without using a national standard from the list of national standards for the purposes of applying technical regulations in the field of railway transport.

Keywords: national standard, technical regulation, conformity assessment, specified requirements, presumption of conformity.

REFERENCES

1. Zakon Ukrainy Pro tekhnichni rehlementy ta otsinku vidpovidnosti vid 15 sichnia 2015 roku № 124-VIII [Law of Ukraine about technical regulations and conformity assessment from January 15 2015, № 124-VIII]. (2015, January 15). Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» – «Legislation of Ukraine» database. Vidomosti Verkhovnoi Rady – Bulletin of Verkhovna Rada of Ukraine. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/124-19#Text> [in Ukrainian].
2. Nakaz Ministerstva infrastruktury Ukrainy Pro zatverdzhennia Pereliku natsionalnykh standartiv dlia tsilei zastosuvannia Tekhnichnoho rehlementu bezpeky infrastruktury zalizhnychnoho transport vid 30 sichnia 2022 roku № 60 [Order of the Ministry of Infrastructure of Ukraine on the approval of the List of national standards for the purposes of applying the Technical Regulation of Railway Transport Infrastructure Safety from January 30 2022, No. 60]. (2022, January 26). Retrieved from: https://mindev.gov.ua/storage/app/imported_content/66bb57b765d98.pdf [in Ukrainian].
3. Nakaz Ministerstva infrastruktury Ukrainy Pro zatverdzhennia Pereliku natsionalnykh standartiv dlia tsilei zastosuvannia Tekhnichnoho rehlementu bezpeky rukhomoho skladu zalizhnychnoho transportu vid 3 liutoho 2022 № 69 [Order of the Ministry of Infrastructure of Ukraine On the approval of the List of national standards for the purposes of applying the Technical Regulation of Railway Rolling Stock Safety from February 3 2022, No. 69]. (2022, February 3). Retrieved from: https://mindev.gov.ua/storage/app/imported_content/66bb57bcc678f.pdf [in Ukrainian].
4. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy Pro zatverdzhennia Tekhnichnoho rehlementu bezpeky rukhomoho skladu zalizhnychnoho transport vid 30 grudnia 2015 roku № 1194 [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine on the approval of the Technical Regulations for the Safety of Rolling Stock of Railway Transport from December 30 2015 № 1194-2015]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1194-2015-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].
5. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy Pro zatverdzhennia Tekhnichnoho rehlementu bezpeky infrastruktury zalizhnychnoho transport vid 11 lyupnia 2013 roku № 494 [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine on the approval of the Technical Regulations for the Safety of Infrastructure of Railway Transport from July 11 2013 № 494]. (2013, July 11). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/494-2013-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].
6. Zakon Ukrainy «Uhoda pro asotsiatsiu mizh Ukrainoiu, z odniiei storony, ta Yevropeiskym Soiuzom, Yevropeiskim spivtovarystvom z atomnoi enerhii i ikhnimy derzhavamy-chlenamy, z inshoi storony» vid 16 ver. 2014 r. № 1678-VII [ASSOCIATION AGREEMENT between Ukraine, on the onehand, and the European Union, the European Atomic Energy Community and their member states, on the other hand from September 16,

2014, No. 1678-VII]. (2014, September 16) Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text [in Ukrainian]

7. Karpa M. (2025) Reformuvannya natsionalnoy systemy standartyzatsii Ukrainy u konteksti yevrointegratsii: Dynamika rozvytku ta perspektyvy [Reforming the National Standardization System of Ukraine in the Context of European Integration: Development Dynamics and Prospects] *Zbirnyk naukovykh prats «Publichne upravlinnia: kontseptsii, paradyhma, rozvytok, udoskonalennia» – Collection of scientific works "Public administration: concepts, paradigm, development, improvement"*, 14, 34-43 DOI: <https://doi.org/10.31470/2786-6246-2025-14-34-43> [in Ukrainian].

8. EU: Product legislation – revision of the New Legislative Framework (NLF). An official website of the European Union. URL: https://single-market-economy.ec.europa.eu/single-market/goods/new-legislative-framework_en (12.09.2025).

9. Hamburh I. A. (2017) Yevrointehratsiynyy vektor rozvytku zakonodavstva Ukrayiny pro tekhnichne rehulyuvannya: Problemy ta perspektyvy [The european integration vector of development of ukrainian legislation on technical regulation: problems and prospect] Retrieved from: <http://molodyvcheny.in.ua/files/journal/2017/4/67.pdf>

10. Pechylina, O. V. (2019). Pytannya harmonizatsii vitchyznyanoi normatyvno-pravovoi bazy v haluzi standartyzatsii ta tekhnichnoho rehulyuvannya vidpovidno do vymoh Yevropeyskoho Soyuzu. [Issues of harmonization of national normative legal base in standardization and technical regulation accordingly to requirements of European Union]. *Aktualni problemy vitchyznyanoi yurysprudentsii. Spetsvyypusk – Current problems of domestic jurisprudence. Special issue*, 61-64. Retrieved from: <https://apnl.dnu.in.ua/2019/18.pdf> [in Ukrainian].

11. Zakon Ukrainy Pro standartyzatsiiu vid 5 chervnya 2014 roku № 1315-VII [Law of Ukraine On standardization from June 5 2014, No. 1315-VII]. (2014. June 5). *Vidomosti Verkhovnoi Rady – Bulletin of Verkhovna Rada of Ukraine*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/311315-18#Text> [in Ukrainian].

12. Roz'yasnennya Ministerstva ekonomichnoho rozvytku i torhivli Ukrainy shchodo zastosuvannya standartiv, u tomu chysli u zv'yazku zi skasuvanniam mizhderzhavnykh standartiv (HOST) u 2015 rotsi [Clarification of the Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine on the application of standards, including in connection with the cancellation of interstate standards (GOST) in 2015] Retrieved from: <https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=964dd5be-37b3-4738-ab45-2e7ca4677167&title=RoziasnenniaMinisterstvaEkonomichnogoRozvitkuITorgivliUkrainiZPitanZastosuvanniaStandartiv-UTomuChisliVZviazkuZiSkasuvanniamU2015-RotsiMizhderzhavnykhStandartiv> [in Ukrainian].

13. Zakon Ukrainy Pro zahalnu bezpechnist nekharchovoi produktsii vid 2 hrudnya 2010 roku № 2736-VI [Law of Ukraine On the general safety of non-food products from December 2 2010, № 2736-VI] (2010, December 2) *Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» – «Legislation of Ukraine» database. Vidomosti Verkhovnoi Rady – Bulletin of Verkhovna Rada of Ukraine* 2011, 22, 145). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2736-17#Text> [in Ukrainian].

14. Hospodarskyi Kodeks Ukrainy vid 16 sichnia 2003 roku № 436-IV [Commercial Code of Ukraine] from January 16 2003, № 4364-IV (2003. January 16) *Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» – «Legislation of Ukraine» database. Vidomosti Verkhovnoi Rady – Bulletin of Verkhovna Rada of Ukraine* 2003, 18, 19-20, 21-22, 144) Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/436-15#Text> [in Ukrainian].

15. Zakon Ukrainy Pro zakhyst prav spozhyvachiv vid 12 travnya 1991 roku № 1023-XII [On consumer protection from May 12 1991, № 1023-XII] (1991, May 12) *Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» – «Legislation of Ukraine» database. Vidomosti Verkhovnoi Rady URSR (VVR)– Bulletin of Verkhovna Rada of Ukraine*. 1991, № 30, st. 379) Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1023-12#Text> [in Ukrainian].

16. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy Pro vnesennia zmin do Tekhnichnoho rehlementu bezpeky infrastruktury zalizhnychnoho transportu i Tekhnichnoho rehlementu bezpeky rukhomoho skladu zalizhnychnoho transportu vid 26 sichnnia 2022 roku № 53 [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine on approval of changes to the Technical Regulations of Infrastructure of Railway Transport and for the Safety of Rolling Stock of Railway Transport from January 26 2022, № 53]. (2022, January 26). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/53-2022-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].

17. Zakon Ukrainy Pro pravotvorchu diyalnist vid 24 serpnia 2023 roku № 3354-IV [About lawmaking activities from August 24 2023, № 3354-IV] (2023, August 24) *Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» – «Legislation of Ukraine» database. Vidomosti Verkhovnoi Rady – Bulletin of Verkhovna Rada of Ukraine*. 2023, № 93, st.364). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3354-20#Text> [in Ukrainian].



Стаття надійшла 27.04.2026
Стаття прийнята 30.04.2026
Опубліковано 29.05.2026

К. Ю. Холод

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Тел.: +38 050 308 2306, E-mail: ekaterinaholod5@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1457-9220>

Т. В. Попова

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Тел.: +38 068 437 4023, E-mail: popova_tatiana_ukrniiv@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5168-0132>

БРОНЮВАННЯ ПРАЦІВНИКІВ ЯК ЗАПОРУКА СТАБІЛЬНОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ ПІДПРИЄМСТВ ГАЛУЗІ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

У статті досліджено сучасний механізм бронювання військовозобов'язаних працівників підприємств залізничного транспорту в умовах воєнного стану та постійного оновлення мобілізаційного законодавства України. Обґрунтовано актуальність проблеми збереження кадрового потенціалу підприємств галузі внаслідок демографічних втрат, зовнішньої міграції населення, дефіциту кваліфікованих кадрів і посилення мобілізаційних заходів держави. Визначено, що бронювання працівників є одним із ключових інструментів забезпечення безперервності функціонування критичної інфраструктури та стабільності виробничих процесів у сфері залізничного транспорту.

Проаналізовано чинну нормативно-правову базу, що регулює порядок бронювання військовозобов'язаних, зокрема положення Закону України «Про мобілізаційну підготовку та мобілізацію», постанов Кабінету Міністрів України № 76, № 560, № 650 та інших нормативних актів. Особливу увагу приділено критеріям визначення підприємств критично важливими для функціонування економіки та забезпечення життєдіяльності населення в особливий період. Досліджено практичні аспекти застосування галузевих і регіональних критеріїв, вимог щодо рівня середньої заробітної плати, відсутності податкової заборгованості, а також підтвердження стратегічного значення підприємства для держави.

У роботі розкрито основні етапи процедури бронювання працівників засобами цифрових сервісів Порталу «Дія» та застосунок «Резерв+». Охарактеризовано механізм автоматичної перевірки даних через державні реєстри, порядок формування списків військовозобов'язаних працівників і надання відстрочки від мобілізації. Встановлено, що цифровізація процедури бронювання сприяє підвищенню оперативності прийняття рішень, прозорості обробки інформації та

© Холод К. Ю., Попова Т. В., 2026

ефективності кадрового управління. Зроблено висновок, що підтримання статусу критично важливого підприємства є визначальною умовою забезпечення кадрової стабільності підприємств залізничного транспорту, збереження трудового потенціалу та підтримання належного рівня функціонування транспортної системи держави в умовах тривалої збройної агресії та особливого періоду.

Ключові слова: бронювання, критично важливе підприємство, Портал «Дія», «Резерв+», залізничний транспорт.

Вступ та постановка проблеми

У сучасних умовах функціонування підприємств залізничного транспорту України особливої актуальності набуває проблема збереження трудового потенціалу та забезпечення безперервності основної діяльності. Вплив воєнного стану, демографічні втрати та посилення мобілізаційних заходів формують нові виклики для кадрової політики галузі.

По-перше, суттєве скорочення персоналу зумовлене міграційними процесами. Значна частина працівників, передусім жінки з дітьми, виїхали за кордон. Наразі лише незначна їх частка продовжує виконувати трудові обов'язки дистанційно за погодженням із керівництвом. Водночас дистанційна форма зайнятості не завжди забезпечує належний рівень виконання виробничих завдань, що зумовило звільнення значної кількості працівників.

По-друге, кадровий дефіцит посилюється внаслідок активізації мобілізаційних заходів. Із продовженням воєнного стану спостерігається зростання обсягів призову військовозобов'язаних чоловіків віком від 25 до 60 років. Це обмежує їхню можливість безперешкодного пересування та виконання професійних обов'язків безпосередньо на робочих місцях. Крім того, законодавство України у сфері оборони перебуває в стані постійного оновлення, спрямованого на розширення мобілізаційного ресурсу держави.

Зокрема, з початку повномасштабного вторгнення до Закону України «Про мобілізаційну підготовку та мобілізацію» від 21.10.1993 № 3543-XII [1] було внесено понад десяти змін, які поступово посилюють вимоги щодо надання відстрочок та умов бронювання. Також постійно доопрацьовується Постанова Кабінету Міністрів України від 16 травня 2024 р. № 560 «Питання проведення призову громадян на військову службу під час мобілізації, на особливий період» [2], що свідчить про динамічність нормативно-правового регулювання у цій сфері.

У таких умовах для більшості керівників підприємств залізничного транспорту ключовим інструментом збереження кадрового потенціалу стає бронювання працівників. Відповідно до ст. 25 Закону України [1] та Постанови Кабінету Міністрів України «Деякі питання реалізації положень Закону України «Про мобілізаційну підготовку та мобілізацію» щодо бронювання військовозобов'язаних на період мобілізації та на воєнний час» від 27.01.2023 № 76 [3] бронювання військовозобов'язаних передбачає надання відстрочки від призову працівникам підприємств, які мають статус критично важливих для функціонування економіки та забезпечення життєдіяльності населення.

Бронювання виконує функцію інституційного механізму балансування між потребами оборони держави та необхідністю підтримання стабільної роботи стратегічних галузей, зокрема залізничного транспорту. Воно сприяє безперервності виробничих процесів, забезпечує функціонування критичної інфраструктури та водночас

стимулює підприємства до підвищення власної значущості через отримання статусу «критично важливих».

Крім того, механізм бронювання має мотиваційний ефект для працівників, оскільки передбачає необхідність дотримання правил військового обліку та підвищення професійної компетентності. У контексті тривалої збройної агресії значення цього інструменту лише зростає. За наявними оцінками, станом на 2026 рік кількість заброньованих працівників в Україні досягла близько 1,3 мільйона осіб, що свідчить про масштабність потреби у збереженні трудових ресурсів.

Отже, бронювання військовозобов'язаних є важливим елементом державної політики у сфері мобілізації та водночас ефективним засобом забезпечення кадрової стабільності підприємств залізничного транспорту в умовах воєнного стану.

Аналіз досліджень і публікацій. Єдиного документа, який би описував весь процес бронювання від початку до кінця немає. Питання бронювання працівників підприємства галузі залізничного транспорту розглядається у законодавчих актах України. Статтею 25 Закону України [1] встановлено загальні підстави для бронювання та обмеження строку дії. Своєю чергою, Постановою КМУ від 27.01.2023 № 76 [3] визначено основний порядок бронювання, узагальнено описано процедуру отримання відстрочки та наведено перелік критеріїв критичності. Постановою Кабінету Міністрів України «Деякі питання бронювання військовозобов'язаних під час воєнного стану» від 05.06.2024 № 650 [4] затверджено Порядок бронювання військовозобов'язаних під час воєнного стану засобами Єдиного державного веб-порталу електронних послуг (портал «Дія»), адже процес отримання бронювання на сьогодні повністю цифровізований.

Мета статті – проаналізувати чинні законодавчі акти, з урахуванням галузевих та регіональних вимог, від яких залежить визначення критичної важливості підприємства галузі залізничного транспорту для економіки та бронювання персоналу.

Викладення основного дослідження.

Процес отримання бронювання можна порівняти з ретельно організованим проектом, що передбачає чітко визначені етапи реалізації та контрольні точки для оцінки результатів. Своєю чергою для працівників галузі залізничного транспорту він виглядає наступним чином:

- ✓набути статусу критичного підприємства – отримати позитивне рішення органу влади;
- ✓сформувати список працівників з необхідними даними та строками відстрочки;
- ✓подати через Портал «Дія» – чекати автоматичної перевірки в реєстрі;
- ✓отримати підтвердження: електронний запис на Порталі «Дія» та у «Резерв+».

Перший крок є основним етапом у процесі бронювання, який займає багато сил та часу. Нині бронювання військовозобов'язаних можливе за двома Постановами: Постановою Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку бронювання військовозобов'язаних за органами державної влади, іншими державними органами, органами місцевого самоврядування та підприємствами, установами і організаціями на період мобілізації та на воєнний час» від 04.02.2015 № 45 [5] та Постановою КМУ від 27.01.2023 № 76 [3]. Але Постанова КМУ від 04.02.2015 № 45 [5] має гриф «Для службового користування» («ДСК») та її немає у відкритому доступі. Зокрема, забронювати своїх працівників за нею зможуть лише ті роботодавці, які виконують мобілізаційні завдання (замовлення) Міністерства оборони. У свою чергу, Постанова КМУ від 27.01.2023 № 76 [3] є у вільному доступі та передбачає бронювання працівників на підприємствах, в установах та організаціях, які в установленому порядку визначе-

но критично важливими для функціонування економіки та забезпечення життєдіяльності населення в особливий період, тому для бронювання працівників більшості підприємств галузі залізничного транспорту доцільно використовувати саме її.

Отже, основним інструментом, що регламентує процедуру бронювання працівника підприємства залізничного транспорту є Постанова КМУ від 27.01.2023 № 76 [3], якою затверджено Критерії та порядок, за якими здійснюється визначення підприємств, установ та організацій, які є критично важливими для функціонування економіки та забезпечення життєдіяльності населення в особливий період, а також критично важливими для забезпечення потреб Збройних Сил, інших військових формувань в особливий період (далі – Критерії та порядок).

Критично важливим для функціонування економіки та забезпечення життєдіяльності населення в особливий період є підприємство, визнане відповідним за трьома або більше критеріями згідно з п. 2 Критеріїв та порядку, а саме:

1) загальна сума сплачених податків, зборів, платежів до державного та місцевих бюджетів, крім митних платежів, та сума сплаченого єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування протягом звітного податкового року перевищує еквівалент 1,5 млн євро, визначений за середньозваженим офіційним курсом Національного банку за той самий період, що підтверджується довідкою контролюючого органу, в якому на обліку перебуває підприємство, установа, організація;

2) сума надходжень в іноземній валюті, крім кредитів і позик, за звітний податковий рік перевищує еквівалент 32 млн євро, визначений за середньозваженим офіційним курсом Національного банку за той самий період, що підтверджується довідкою відповідного обслуговуючого банку;

3) підприємство, установа, організація має стратегічне значення для економіки і безпеки держави відповідно до переліку об'єктів державної власності, що мають стратегічне значення для економіки і безпеки держави, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 4 березня 2015 р. № 83 (Офіційний вісник України, 2015 р., № 20, ст. 555) [6];

4) підприємство, установа, організація має важливе значення для галузі національної економіки чи забезпечення потреб територіальної громади. Критерії, за якими здійснюється визначення підприємства, установи, організації, які мають важливе значення для галузі національної економіки чи забезпечення потреб територіальної громади, встановлюються органами виконавчої влади, іншими державними органами, органами державного управління, юрисдикція яких поширюється на всю територію України, за сферою їх управління чи галуззю національної економіки або обласною, Київською та Севастопольською міською держадміністрацією (військовою адміністрацією у разі її утворення) з урахуванням потреб територіальної громади, за погодженням з Мінекономіки та Міноборони;

5) відсутність заборгованості зі сплати податків до державного та місцевих бюджетів та єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування, що підтверджується довідкою про відсутність заборгованості з платежів, контроль за справлянням яких покладено на контролюючі органи, або витягом з інформаційної системи органів ДПС щодо статусу розрахунків платника з бюджетом та цільовими фондами, засвідченим керівником підприємства, установи, організації;

6) розмір нарахованої середньої заробітної плати застрахованих осіб – працівників:

– державних і комунальних підприємств, установ і організацій, а також господарських товариств, у статутному капіталі яких більше 50 відсотків акцій (часток) належать державі або перебувають в комунальній власності, та господарських то-

вариств, більше 50 відсотків акцій (часток) яких належать господарським товариствам, частка держави або комунальної власності в яких становить 100 відсотків, суб'єктів господарювання – виробників електричної та теплової енергії, до складу яких входять виробничі (генеруючі) потужності, що були зруйновані або пошкоджені внаслідок збройної агресії Російської Федерації, підприємств, що обслуговують об'єкти, внесені до секторального переліку об'єктів критичної інфраструктури сектору системи життєзабезпечення, операторів газорозподільних систем, нафтопереробних підприємств, у статутному капіталі яких більше 25 відсотків акцій (часток) належать державі, за останній календарний місяць становить не менше розміру середньої заробітної плати у регіоні за IV квартал 2021 р. (відповідно до даних Держстату), що підтверджується довідкою, наданою підприємством, установою, організацією, господарським товариством;

– підприємств, установ, організацій за останній календарний місяць становить не менше розміру мінімальної заробітної плати по країні, помноженої на коефіцієнт 2,5, що підтверджується довідкою, наданою підприємством, установою, організацією (крім державних і комунальних підприємств, установ і організацій, господарських товариств, у статутному капіталі яких більше 50 відсотків акцій (часток) належать державі або перебувають у комунальній власності, та господарських товариств, більше 50 відсотків акцій (часток) яких належать господарським товариствам, частка держави або комунальної власності в яких становить 100 відсотків, суб'єктів господарювання – виробників електричної та теплової енергії, до складу яких входять виробничі (генеруючі) потужності, що були зруйновані або пошкоджені внаслідок збройної агресії Російської Федерації, підприємств, що обслуговують об'єкти, внесені до секторального переліку об'єктів критичної інфраструктури сектору системи життєзабезпечення, операторів газорозподільних систем, нафтопереробних підприємств, у статутному капіталі яких більше 25 відсотків акцій (часток) належать державі);

7) підприємство, установа, організація є резидентом «Дія.City»;

8) підприємство є постачальником електронних комунікаційних послуг з використанням мереж мобільного зв'язку, середньомісячний розмір чистого доходу якого за даними останньої фінансової звітності перевищує 200 млн. гривень або постачальником електронних комунікаційних послуг з використанням мереж фіксованого зв'язку, середньомісячний розмір чистого доходу якого за даними останньої фінансової звітності перевищує 20 млн. гривень, що підтверджується звітом про фінансові результати з відмітками (штампами) контролюючого органу, який отримав фінансову звітність, із зазначенням дати її отримання.

На наш погляд, критерії щодо сплачених податків та зборів більш як 1,5 млн євро (1), суми надходжень в іноземній валюті понад 32 млн євро (2), резидентство «Дія. City» (7) та постачання електронних комунікаційних послуг з середньомісячними доходами більше 20 млн та 200 млн гривень (8) (залежно від виду зв'язку) є вкрай складними для виконання більшістю юридичних осіб галузі залізничного транспорту. До таких можуть відноситися монополісти (наприклад, АТ «Укрзалізниця») або холдинги (наприклад, ТОВ «Метінвест Холдинг»).

Тому для отримання статусу критично важливого підприємства для функціонування економіки та забезпечення життєдіяльності населення в особливий період доцільно розглядати критерії, що стосуються стратегічного значення для економіки та безпеки держави (3); важливого значення для певної галузі національної економіки чи забезпечення потреб територіальних громад (4); сплати податків до держа-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

вного та місцевого бюджетів, ЄСВ (5); розміру середньої заробітної плати застрахованих осіб-працівників (6). Тож розглянемо їх більш детально далі.

Перелік об'єктів державної власності, що мають стратегічне значення для економіки і безпеки держави, затверджений Постановою КМУ від 04.03.2015 № 83 [6]. На сьогодні він налічує кілька сотень підприємств (остання редакція 2026 р.) за різними сферами діяльності. Точна кількість змінюється через регулярні оновлення, зокрема виключення чи додавання підприємств задля оборонних та економічних потреб.

Як бачимо з Порядку № 76 [3], критерії важливого значення для певної галузі національної економіки чи забезпечення потреб територіальних громад (галузеві та регіональні критерії для бронювання) встановлені окремими наказами Міністерств та відомств, розпорядженнями обласних державних/військових адміністрацій. Актуальні галузеві та регіональні критерії представлено у таблицях 1 та 2 відповідно.

Таблиця 1. – Галузеві критерії для бронювання, які застосовуються для визначення критичності з метою бронювання (станом на 16.03.2026)

Орган влади	Документ
Адміністрація Держспецзв'язку	наказ від 27.12.2024 № 791
Державне космічне агентство	наказ від 18.12.2024 № 190
Державне агентство України з питань кіно	наказ від 10.01.2025 № 7
Державна служба статистики України	наказ від 16.12.2024 № 279
Державна інспекція ядерного регулювання України	наказ від 13.01.2025 № 34
МВС (поліція)	наказ від 03.04.2025 № 245
Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України (лісове та мисливське господарство)	наказ від 15.01.2025 № 60
Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України (галузі управління зоною відчуження та зоною безумовного (обов'язкового) відселення, подолання наслідків Чорнобильської катастрофи, зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему, поводження з радіоактивними відходами на стадії їх довгострокового зберігання і захоронення)	наказ від 30.01.2025 № 164
Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів (галузь навколишнього природного середовища)	наказ від 16.12.2024 № 1668
Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів (сфера геологічного вивчення та раціонального використання надр)	наказ від 14.01.2025 № 53
Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів (водне господарство, управління, використання та відтворення поверхневих водних ресурсів)	наказ від 29.01.2025 № 151
Мін'юст (виконання завдань ДКВП)	наказ від 13.01.2025 № 102/5

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Продовження таблиці 1

1	2
Мін'юст (сфера надання безоплатної правничої допомоги)	наказ від 06.01.2025 № 48/5
Мін'юст (установи судових експертиз, що належать до сфери управління Мін'юсту)	наказ від 03.01.2025 № 40/5
Мін'юст (підприємства, віднесені до сфери управління Мін'юсту)	наказ від 13.01.2025 № 110/5
Мінекономіки	наказ від 18.12.2024 № 28003
Міністерство енергетики	наказ від 15.12.2025 № 525
Міністерство аграрної політики та продовольства	наказ від 10.12.2024 № 4282
Міністерство аграрної політики та продовольства (рибне господарство та рибна промисловість, охорона, використання та відтворення водних біоресурсів, регулювання рибальства, меліорація земель та експлуатації державних водогосподарських об'єктів комплексного призначення, міжгосподарських зрошувальних і осушувальних систем)	наказ від 07.02.2025 № 738
Міністерство закордонних справ	наказ від 26.12.2024 № 561
Міністерство охорони здоров'я	наказ від 05.12.2024 № 2033
Міністерство розвитку громад та територій України (транспорт, поштовий зв'язок, будівництво, енергоефективності та житлово-комунального господарства)	наказ від 31.12.2024 № 1506
Міністерство розвитку громад та територій України (авіаційний та автомобільний транспорт, туризм та будівництво)	наказ від 16.01.2025 № 50
Міністерство внутрішніх справ України	наказ від 20.01.2025 № 28
Міністерство культури та стратегічних комунікацій України	наказ від 07.02.2025 № 67
Міністерство у справах ветеранів України	наказ від 10.12.2024 № 456
Міністерство молоді та спорту України	наказ від 23.12.2024 № 7742
Міністерство соціальної політики України	наказ від 10.12.2024 № 575-Н, зміни вносить наказ від 02.04.2025 № 162-Н (нова редакція)
Міністерство з питань стратегічних галузей промисловості України	наказ від 26.12.2024 № 192
Міністерство фінансів України	наказ від 19.12.2024 № 649
Міністерство цифрової трансформації України	наказ від 05.12.2024 № 182
Міністерство освіти і науки України	наказ від 06.01.2025 № 10
Міністерство національної єдності України	наказ від 02.04.2025 № 27
ПФУ	постанова від 31.12.2024 № 40-1

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Закінчення таблиці 1

1	2
НБУ	постанова від 24.03.2023 № 32 зі змінами внесеними постановою від 07.02.2025 № 13
НБУ (сфера обов'язкового страхування цивільно-правової відповідальності власників наземних транспортних засобів)	постанова від 11.02.2025 № 17
НБУ (сфера готівкового обігу)	постанова від 07.03.2025 № 28
НБУ (сфера діяльності на платіжному ринку)	постанова від 07.03.2025 № 29
НБУ (сфера страхування)	постанова від 14.03.2025 № 32
НБУ (сфера банківської діяльності)	постанова від 28.03.2025 № 38
НКЦПФР (ринки капіталу та організовані товарні ринки)	рішення від 14.02.2025 № 18/21/1836/K03
Державна служба України з етнополітики та свободи совісті	наказ від 05.02.2025 № Н-21/11
Фонд державного майна України	наказ від 20.02.2025 № 280

Таблиця 2. – Регіональні критерії для бронювання, які застосовуються для визначення критичності з метою бронювання (станом на 04.03.2026)

Обласна державна/військова адміністрація	Документ
Вінницька	Розпорядження № 11-р від 28.01.2026
Волинська	Розпорядження № 631 від 10.11.2025
Дніпропетровська	Розпорядження № 1058/0/527-25 від 01.08.2025
Донецька	Розпорядження № 693/5-25 від 14.10.2025
Житомирська	Розпорядження № 1164 від 14.10.2025
Закарпатська	Розпорядження № 595 від 21.08.2025
Запорізька	Розпорядження № 142 від 11.02.2026
Івано-Франківська	Розпорядження № 538 від 01.12.2025
Київська міська військова адміністрація	Розпорядження № 1010 від 24.09.2025
Київська	Розпорядження № 1579 від 30.10.2025
Кіровоградська	Розпорядження № 1446-р від 12.09.2025
Луганська	Розпорядження № 9 від 10.01.2025
Львівська	Розпорядження № 1184/0/5-25ВА від 09.09.2025
Миколаївська	Розпорядження № 366-р від 03.09.2025

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Закінчення таблиці 2

1	2
Одеська	Розпорядження № 854/А-2025 від 03.09.2025
Полтавська	Розпорядження № 760 від 08.09.2025 зі змінами внесеними розпорядженням № 235 від 20.02.2026
Рівненська	Розпорядження № 752 від 24.12.2024
Сумська	Розпорядження № 3-ОД від 05.01.2026
Тернопільська	Розпорядження № 584/01.02-01 від 03.09.2025
Харківська	Розпорядження № 87В від 02.02.2026
Херсонська	Розпорядження № 570 від 22.10.2025
Хмельницька	Розпорядження № 999/2025-р від 10.10.2025
Черкаська	Розпорядження № 5 від 04.11.2025
Чернівецька	Розпорядження № 1218-р від 09.09.2025
Чернігівська	Розпорядження № 1089 від 28.08.2025

Якщо за результатами аналізування галузевих критеріїв згідно з таблицею 1 підприємство виконує певні з них, то для підтвердження виконання галузевого критерію підприємство залізничного транспорту надсилає підтвердні документи до відповідного органу влади. Виконання декількох галузевих критеріїв підвищує шанси підприємства на позитивне рішення. У разі відповідності вимогам, профільне міністерство або ОВА видає наказ про визнання підприємства критично важливим. Аналогічно з регіональними критеріями відповідно до таблиці 2 – відповідність діяльності за декількома критеріями зараховується як виконання критерію (4) Критеріїв та порядку.

Критерій щодо розміру середньої заробітної плати застрахованих осіб-працівників (6) є ключовим та основним при розгляді підприємства у сфері залізничного транспорту критично важливим для функціонування економіки та забезпечення життєдіяльності населення в особливий період. Розрахунок середньої заробітної застрахованих осіб-працівників підприємства галузі залізничного транспорту здійснюють відповідно до даних Податкового розрахунку сум доходу, нарахованого (сплаченого) на користь платників податків – фізичних осіб, і сум утриманого з них податку, а також сум нарахованого єдиного внеску (затверджено наказом Міністерства фінансів України від 13.01.2015 № 4 (у редакції наказу Міністерства фінансів України від 24.01.2025 № 39)) [7] щомісячно, враховуючи роз'яснення листа Мінекономіки № 2704-25/20968-01 від 07.03.2025 [8]. Середня заробітна плата працівників дорівнює загальній сумі нарахованого доходу (рядок 1 (1.1+1.3+1.4)) поділеній на кількість працівників, яким фактично нараховано дохід у звітному періоді (рядок 103). Нарахована щомісячна заробітна плата протягом строку, на який надано відстрочку від призову на військову службу під час мобілізації та на воєнний час має бути не нижче за розмір мінімальної заробітної плати по країні, помноженій на коефіцієнт 2,5 (на сьогодні не менше 21 617,50 грн). Крім того, відповідно до п. 8

Порядку № 76 військовозобов'язаним працівникам критично важливих підприємств, критично важливих установ, які включаються до списків, повинна бути нарахована щомісячна заробітна плата протягом строку, на який надано відстрочку від призову на військову службу під час мобілізації та на воєнний час, не нижче за розмір мінімальної заробітної плати по країні, помноженої на коефіцієнт 2,5. Регулює автоматичний обмін даними між Пенсійним фондом та Міноборони для перевірки зарплат та офіційного працевлаштування Постанова Кабінету Міністрів України «Деякі питання бронювання військовозобов'язаних на період мобілізації та на воєнний час» № 1608 від 08.12.2025 [9].

Як бачимо, важливий рівень заробітної плати як окремого працівника, так і підприємства загалом. Однак законодавство передбачає винятки. Постанова № 76 [3] містить чіткий перелік підприємств і організацій, на які ця умова не поширюється.

До таких суб'єктів господарювання належать:

- ✓ державні та комунальні підприємства, установи й організації;
- ✓ господарські товариства, у яких понад 50 % статутного капіталу належить державі або територіальній громаді, а також товариства, контрольовані такими підприємствами;
- ✓ резиденти правового режиму «Дія.City»;
- ✓ релігійні організації як юридичні особи;
- ✓ підприємства – виробники електричної та теплової енергії, якщо їхні генеруючі потужності були пошкоджені або зруйновані внаслідок збройної агресії російської федерації;
- ✓ суб'єкти господарювання, які обслуговують об'єкти, включені до секторального переліку критичної інфраструктури систем життєзабезпечення;
- ✓ працівники операторів газорозподільних систем, задіяні в аварійно-відновлювальних роботах та заходах з безпечної експлуатації газових мереж;
- ✓ нафтопереробні підприємства з державною часткою понад 25 %, визначені Міністерством енергетики критично важливими;
- ✓ працівники юридичних осіб, що здійснюють охорону об'єктів паливно-енергетичного комплексу та повністю контролюються державою.

Розмір їхньої середньої заробітної плати за останній календарний місяць має бути не менше розміру середньої заробітної плати у регіоні за IV квартал 2021 р. (відповідно до даних Держстату), що підтверджується довідкою, наданою підприємством, установою, організацією, господарським товариством.

Також до важливого критерію визначення підприємства галузі залізничного транспорту відносять вимогу щодо сплати податків до державного та місцевого бюджетів, ЄСВ (5). Підтвердженням виконання цього критерію є довідка про відсутність заборгованості. Для отримання довідки про відсутність заборгованості платник подає заяву у паперовій формі до державної податкової інспекції за основним місцем обліку такого платника або електронній формі через Електронний кабінет. Для подання в електронній формі слід обрати форму J1300306 (юридичної особи) або F1300306 (фізичної особи) у меню «Заяви, запити для отримання інформації». Заява складається з обов'язковим посиланням на відповідний нормативно-правовий акт, яким передбачено необхідність підтвердження відсутності заборгованості з платежів, контроль за справлянням яких покладено на контролюючі органи, та зазначенням найменування суб'єкта (підприємства, установи, організації), до якого (якої) довідку буде подано платником. Довідка надається безкоштовно протягом 5 робочих днів та діє 10 календарних днів.

Довідку у паперовій формі платник (його законний чи уповноважений представник) отримує безпосередньо в органі, до якого було подано заяву, у електронній формі платник – у приватній частині електронного кабінету. Довідка надається за формою згідно з додатком 1 до Порядку надання довідки про відсутність заборгованості з платежів, контроль за справлянням яких покладено на контролюючі органи, затвердженого наказом Міністерства фінансів України від 03.09.2018 № 733 [10]. Перевірити справжність електронної довідки можна у відкритій частині кабінету за податковим номером та реквізитами документа.

Після аналізування критеріїв, зазначених у п. 2 Критеріїв та порядку про визнання підприємства критично важливим для функціонування економіки та забезпечення життєдіяльності населення в особливий період, та відповідності трьом та більше критеріям керівник підприємства залізничного транспорту готує лист-звернення до центрального органу виконавчої влади, іншого державного органу, органу державного управління, юрисдикція якого поширюється на всю територію України, або до обласної, Київської та Севастопольської міської держадміністрації (військової адміністрації у разі її утворення). До звернення у обов'язковому порядку додають копії підтвердних документів виконання критеріїв, інформацію про загальну кількість військовозобов'язаних працівників підприємства, а також інформацію про подання підприємством в установленому законодавством порядку податкової звітності за останній податковий період (копію податкової декларації з відмітками (штампами) контролюючого органу, який отримав податкову декларацію, із зазначенням дати її отримання). Відповідно до чинного законодавства строк розгляду документів не більше 10 робочих днів, але на практиці цей процес займає більше часу. За результатами розгляду документів про виконання критеріїв орган, до якого вони подавалися, надає письмове рішення про відповідність (наказ) або невідповідність підприємства галузі залізничного транспорту критеріям.

У разі позитивного рішення орган, що надав критичність, вносить необхідні дані до Порталу «Дія», серед яких повне найменування юридичної особи, код згідно з ЄДРПОУ юридичної особи, місцезнаходження юридичної особи, підстави для бронювання військовозобов'язаних працівників державного органу, критично важливого підприємства, критично важливої установи (дата та номер наказу).

Після цього керівник підприємства галузі залізничного транспорту переходить до наступного етапу – подачі заявки на бронювання військовозобов'язаних через Портал «Дія» відповідно до складених ним списків. Крім того, він має врахувати той факт, що забронювати можливо лише військовозобов'язаних працівників підприємства галузі залізничного транспорту, які не мають порушень правил військового обліку. Бронюванню підлягає 50 % військовозобов'язаних працівників підприємства галузі залізничного транспорту. У окремих випадках за рішеннями Міністерства оборони, Міністерства розвитку територій та громад, Міністерства економіки України ця норма може бути збільшена під час виконання певних договорів чи завдань. Після подачі керівником підприємства галузі залізничного транспорту відбувається перевірка: система автоматично звіряє дані з реєстром «Оберіг», підтверджуючи військовий облік по кожному працівнику. Якщо все гаразд, то така відстрочка надається за 72 години, а працівник переходить на спеціальний облік.

Після успішного бронювання на Порталі «Дія» та у «Резерв+» з'являється запис «заброньовано». Електронний формат у «Резерв+» виглядає як цифровий запис: статус «заброньовано», терміни дії, підстави з посиланням на реєстр «Оберіг». Якщо бронь активна, ви побачите зелений маркер, як сигнал «все гаразд». Витяг з

Порталу «Дія» – офіційний pdf-файл з QR-кодом, підписаний електронно, де детально розписано вся інформація про працівників підприємства галузі залізничного транспорту.

Зазвичай підтверджувати свою критичність підприємство має не рідше одного разу на рік шляхом надсилання аналогічного пакету документів до органу влади, що надав статус критично важливого. Але це не звільняє підприємство від обов'язку постійного виконання критеріїв критичності. Адже відповідно до п. 6¹ Критеріїв та порядку орган, який прийняв рішення про визначення підприємства критично важливим для функціонування економіки та забезпечення життєдіяльності населення в особливий період, здійснює моніторинг його діяльності за звітний податковий період. Якщо якийсь із критеріїв не виконується, то статус втратиться та система скасує відстрочку через «Дію».

Висновки.

З вищевикладеного бачимо, що бронювання працівників підприємств галузі залізничного транспорту є складним процесом, що потребує чіткої поетапності. Отримання критичної важливості підприємства для економіки на відповідність трьом та більше критеріям є основною задачею керівництва підприємства галузі залізничного транспорту для забезпечення бронювання працівників. Після отримання позитивного рішення щодо критичності підприємства проводять бронювання через Портал «Дія». Цифровізація забезпечує швидкість та автоматизацію цього процесу. Протягом 72 годин результат бронювання (зброньовано/відмовлено) відображається в електронному кабінеті юридичної особи, а статус працівника оновлюється в реєстрі «Оберіг» та застосунку «Резерв+» (зелена позначка). Основним ризиком відмови у бронюванні є порушення працівником правил ведення військового обліку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Про мобілізаційну підготовку та мобілізацію: Закон України від 21.10.1993 № 3543-ХІІ: ред. від 12.04.2026 // *Законодавство України: база даних / Верхов. Рада України*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3543-12#Text> (дата звернення: 28.04.2026).
2. Питання проведення призову громадян на військову службу під час мобілізації, на особливий період: Постанова Кабінету Міністрів України від 16.05.2024 № 560: ред. від 11.04.2026 // *Законодавство України: база даних / Верхов. Рада України*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/560-2024-%D0%BF#Text> (дата звернення 05.05.2026)
3. Деякі питання реалізації положень Закону України «Про мобілізаційну підготовку та мобілізацію» щодо бронювання військовозобов'язаних на період мобілізації та на воєнний час». *Постанова Кабінету Міністрів України від 27.01.2023 № 76: ред. від 17.03.2026* // *Законодавство України: база даних / Верхов. Рада України*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/76-2023-%D0%BF#Text> (дата звернення: 28.04.2026).
4. Деякі питання бронювання військовозобов'язаних під час воєнного стану: Постанова Кабінету Міністрів України від 05.06.2024 № 650: ред. від 01.12.2024 // *Законодавство України: база даних / Верхов. Рада України*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/650-2024-%D0%BF#Text> (дата звернення: 28.04.2026)
5. Про затвердження Порядку бронювання військовозобов'язаних за органами державної влади, іншими державними органами, органами місцевого самоврядування та підприємствами, установами і організаціями на період мобілізації та на воєнний час. *Постанова Кабінету Міністрів України від 04.02.2015 № 45 / Ліга 360*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ips.ligazakon.net/document/kp150045?utm_source=buh.ligazakon.net&utm_medium=news&utm_content=cons12 (дата звернення: 28.04.2026).
6. Про затвердження переліку об'єктів державної власності, що мають стратегічне значення для економіки і безпеки держави. *Постанова Кабінету Міністрів України від 04.03.2015 № 83: ред. від*

18.03.2026 // Законодавство України: база даних / Верхов. Рада України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/83-2015-%D0%BF#Text> (дата звернення: 28.04.2026).

7. Про затвердження форми Податкового розрахунку сум доходу, нарахованого (сплаченого) на користь платників податків – фізичних осіб, і сум утриманого з них податку, а також сум нарахованого єдиного внеску і Порядку заповнення та подання податковими агентами Податкового розрахунку сум доходу, нарахованого (сплаченого) на користь платників податків – фізичних осіб, і сум утриманого з них податку, а також сум нарахованого єдиного внеску. *Наказ Міністерства фінансів України від 13.01.2015 № 4 (у редакції наказу Міністерства фінансів України від 24.01.2025 № 39))*: ред. від 06.02.2025 // Законодавство України: база даних / Верхов. Рада України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0111-15#Text> (дата звернення: 08.05.2026).

8. Щодо розрахунку середньої заробітної плати: лист Мінекономіки від 07.03.2025 № 2704-25/20968-01// *Державні сайти України / Міністерство економіки, довкілля та сільського господарства України*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=0c1d88ed-ea47-4a888901-3aacad6bec1&title=ListMinekonomikiVid11-12-2024-2704-25-89101-01-SchodoRozrakhunkuSerednoiZarobitnoiPlati>

9. Деякі питання бронювання військовозобов'язаних на період мобілізації та на воєнний час. *Постанова Кабінету Міністрів України від 08.12.2025 № 1608* // Законодавство України: база даних / Верхов. Рада України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1608-2025-%D0%BF#Text> (дата звернення: 08.05.2026).

10. Про затвердження Порядку надання довідки про відсутність заборгованості платежів, контроль за справлянням яких покладено на контролюючі органи: Наказ Міністерства фінансів України від 03.09.2018 № 733 // *Законодавство України: база даних / Державна податкова служба України*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://tax.gov.ua/zakonodavstvo/podatkovye-zakonodavstvo/nakazi/73067.html> (дата звернення: 08.05.2026).

K. Y. Kholod

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»

33 I. Prykhodka Street, Kremenchuk, Poltava Region, 39621, Ukraine

Tel.: +380503082306, E-mail: ekaterinaholod5@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1457-9220>

T. V. Popova

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»

33 I. Prykhodka Street, Kremenchuk, Poltava Region, 39621, Ukraine

Tel.: +380684374023, E-mail: popova_tatiana_ukrniiv@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5168-0132>

RESERVING EMPLOYEES AS A GUARANTEE OF STABLE OPERATION FOR ENTERPRISES IN THE RAILWAY TRANSPORT SECTOR

This article examines the current mechanism for reserving employees subject to military service at railway transport enterprises under martial law and the constant updates to Ukraine's mobilization legislation. It substantiates the relevance of the problem of preserving the human resource potential of enterprises in the sector due to demographic losses, external migration, a shortage of qualified personnel, and the intensification of state mobilization measures. It is determined that reserving employees is one of the key tools for ensuring the continuity of critical infrastructure operations and the stability of production processes in the railway transport sector.

The current regulatory framework governing the procedure for reserving conscripts is analyzed, in particular the provisions of the Law of Ukraine «On Mobilization Preparation and Mobilization», Resolutions of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 76, No. 560, No. 650, and other regulatory acts. Particular attention is paid to the criteria for identifying enterprises that are critical to the functioning of the economy and ensuring the livelihood of the population during a special period. The practical aspects of applying sectoral and regional criteria, requirements regarding the average wage level, and the absence of tax arrears, as well as confirmation of the enterprise's strategic importance to the state, are examined.

This study describes the main stages of the employee reservation procedure using the digital services of the «Diya» portal and the «Reserve+» app. It outlines the mechanism for automatic data verification through state registries, the procedure for compiling lists of employees subject to military service, and the process for granting deferrals from mobilization. It has been established that the digitization of the reservation procedure contributes to faster decision-making, greater transparency in information processing, and more effective human resources management. Furthermore, it is concluded that maintaining the status of a critically important enterprise is a decisive condition for ensuring personnel stability at railway transport enterprises, preserving the labor force, and maintaining an adequate level of operation of the state's transport system under conditions of prolonged armed aggression and a state of emergency.

Keywords: reservation, critical infrastructure, the «Diya» portal, «Reserve+», railway transport.

REFERENCES

1. Закон України Про мобілізаційну підготовку та мобілізацію від 21 жовтня 1993 року № 3543-XII: редакція від 12 квітня 2026 року [Law of Ukraine On Mobilization Preparation and Mobilization from October 21, 1993 No. 3543-XII, revised on April 12, 2026]. (2026, October 21). *Zakonodavstvo Ukrainy: baza danykh/Verkhovna Rada Ukrainy - Ukrainian Legislation: Database/Verkhovna Rada*. zakon.rada.gov.ua. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3543-12#Text> (accessed April 28, 2026, [in Ukrainian])
2. Постанова Кабінету Міністрів України: Питання проведення призову громадян на військову службу під час мобілізації, на особливий період від 16 травня 2024 року № 560: редакція від 11 квітня 2026 року [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine: Issues of conscription of citizens for military service during mobilization and in a special period No. 560 dated May 16, 2024, revised on April 11, 2026]. (2026). *Zakonodavstvo Ukrainy: baza danykh / Verkhovna Rada Ukrainy - Ukrainian Legislation: Database/Verkhovna Rada*. zakon.rada.gov.ua. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/560-2024-%D0%BF#Text> (accessed May 5, 2026) [in Ukrainian]
3. Постанова Кабінету Міністрів України: Деякі питання реалізації положень Закону України «Про мобілізаційну підготовку та мобілізацію» щодо бронювання військовозобов'язаних на період мобілізації та на воєнний час від 27 січня 2023 року № 76, редакція від 17 березня 2026 [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 76: Some issues of implementing the provisions of the Law of Ukraine «On Mobilization Preparation and Mobilization» regarding reservation of persons liable for military service during mobilization and wartime dated January 27, 2023 № 76, revised on March 17, 2026]. (2026). *Zakonodavstvo Ukrainy: baza danykh/Verkhovna Rada Ukrainy - Ukrainian Legislation: Database/Verkhovna Rada*. zakon.rada.gov.ua. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/76-2023-%D0%BF#Text> (accessed April 28, 2026) [in Ukrainian]
4. Постанова Кабінету Міністрів України: Деякі питання бронювання військовозобов'язаних під час воєнного стану від 5 червня 2024 року, редакція від 1 грудня 2024 року [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine: Some issues of reservation of persons liable for military service during martial law No. 650 dated June 5, 2024, revised on December 1, 2024]. (2024). *Zakonodavstvo Ukrainy: baza danykh / Verkhovna Rada Ukrainy - Ukrainian Legislation: Database/Verkhovna Rada*. zakon.rada.gov.ua. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/650-2024-%D0%BF#Text> (accessed April 28, 2026) [in Ukrainian]

5. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy Pro zatverdzhennia Poriadku broniuvannia viiskovozoboviazanykh za orhanamy derzhavnoi vlady, inshymy derzhavnymy orhanamy, orhanamy mistsevoho samovriaduvannia ta pidpriemstvamy, ustanovamy i orhanizatsiiamy na period mobilizatsii ta na voiennyi chas vid 4 liutoho 2015 roku № 45 [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine On approval of the Procedure for reservation of persons liable for military service by public authorities, other state bodies, local self-government bodies, enterprises, institutions and organizations during mobilization and wartime dated February 4, 2015 No. 45]. (2015). *Liga* 360. Retrieved from: https://ips.ligazakon.net/document/kp150045?utm_source=buh.ligazakon.net&utm_medium=news&utm_content=cons12 (accessed April 28, 2026) [in Ukrainian]

6. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy Pro zatverdzhennia pereliku ob'ektiv derzhavnoi vlasnosti, shcho maiut stratehichne znachennia dlia ekonomiky i bezpeky derzhavy № 83 vid 4 bereznia 2015, redaktsiia vid 18 bereznia 2026 roku [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine On approval of the list of state-owned objects of strategic importance for the economy and security of the state No. 83 dated March 4, 2015, rev. on March 18, 2026]. *Zakonodavstvo Ukrainy: baza danykh / Verkhovna Rada Ukrainy - Ukrainian Legislation: Database/Verkhovna Rada*. zakon.rada.gov.ua. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/83-2015-%D0%BF#Text> (accessed April 28, 2026) [in Ukrainian].

7. Nakaz Ministerstva finansiv Ukrainy Pro zatverdzhennia formy Podatkovoho rozrakhunku sum dokhodu, narakhovanoho (splachenoho) na корист platnykiv podatkov – fizychnykh osib, i sum utrymanoho z nykh podatku, a takozh sum narakhovanoho yedynoho vnesku i Poriadku zapovnennia ta podannia podatkovyamy ahentamy Podatkovoho rozrakhunku sum dokhodu, narakhovanoho (splachenoho) na корист platnykiv podatkov – fizychnykh osib, i sum utrymanoho z nykh podatku, a takozh sum narakhovanoho yedynoho vnesku № 4 vid 13 sichnia 2015 roku (u redaktsii nakazu Ministerstva finansiv Ukrainy vid 24 sichnia 2025 № 39)), red. vid 6 liutoho 2025 roku [Order of the Ministry of Finance of Ukraine On approval of the form of the Tax Calculation of income accrued (paid) in favor of taxpayers – individuals, amounts of tax withheld from them, as well as amounts of accrued unified contribution and the Procedure for completing and submitting the Tax Calculation by tax agents No. 4 dated January 13, 2015, rev. by Order No. 39 dated January 24, 2025, rev. on February 6, 2025]. (2025). *Zakonodavstvo Ukrainy: baza danykh/Verkhovna Rada Ukrainy - Ukrainian Legislation: Database/Verkhovna Rada*. zakon.rada.gov.ua. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0111-15#Text> (accessed May 8, 2026) [in Ukrainian]

8. Shchodo rozrakhunku serednoi zarobitnoi platy: lyst Minekonomiky vid 7 bereznia 2025 roku № 2704-25/20968-01. [Regarding the calculation of average wages: letter of the Ministry of Economy dated March 7, 2025 No. 2704-25/20968-01]. (2025). *Derzhavni saity Ukrainy/Ministerstvo ekonomiky, dovyklytia ta silskoho hospodarstva Ukrainy – Government websites of Ukraine/Ministry of Economy, Environment, and Agriculture of Ukraine*. me.gov.ua. Retrieved from: <https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=0c1d88ed-ea47-4a888901> (accessed May 8, 2026) [in Ukrainian]

9. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy: Deiaki pytannia broniuvannia viiskovozoboviazanykh na period mobilizatsii ta na voiennyi chas № 1608 vid 8 hrudnia 2025 roku [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1608 dated December 8, 2025: Some issues of reservation of persons liable for military service during mobilization and wartime]. (2025). *Zakonodavstvo Ukrainy: baza danykh/Verkhovna Rada Ukrainy - Ukrainian Legislation: Database/Verkhovna Rada*. zakon.rada.gov.ua. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1608-2025-%D0%BF#Text> (accessed May 8, 2026) [in Ukrainian]

10. Nakaz Ministerstva finansiv Ukrainy Pro zatverdzhennia Poriadku nadannia dovidky pro vidsutnist zaborhovanosti platezhiv, kontrol za spravlianniam yakykh pokladeno na kontroliuiuchi orhany vid 3 veresnia 2018 № 733 [Order of the Ministry of Finance of Ukraine On approval of the Procedure for issuing a certificate on no outstanding debts in payments whose collection is entrusted to regulatory authorities controlled by supervisory authorities No. 733 dated September 3, 2018]. (2018). *Zakonodavstvo Ukrainy: baza danykh / Derzhavna podatkova sluzhba Ukrainy - Ukrainian Legislation: Database/Verkhovna Rada: tax.gov.ua*. Retrieved from <https://tax.gov.ua/zakonodavstvo/podatkovye-zakonodavstvo/nakazi/73067.html> (accessed May 8, 2026) [in Ukrainian].



Стаття надійшла 12.04.2026
Стаття прийнята 01.05.2026
Опубліковано 29.05.2026

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

1. Редакція ДП «УкрНДІВ» на постійній основі здійснює прийом наукових та науково-технічних статей в збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад», який виходить два рази на рік (червень, грудень поточного року), з такими термінами подання статей до редакційної колегії:

до 15 травня (термін видання – червень);

до 15 листопада (термін видання – грудень).

Мова видання: українська, англійська, німецька.

2. Критерії відбору статей редакційною колегією

До друку у Збірнику приймаються лише наукові статті, які відповідають тематичному спрямуванню журналу та мають такі необхідні елементи:

– постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями;

– аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор,

– виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання);

– виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів;

– висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку.

З метою дотримання зазначених вище вимог слід **жирним шрифтом виділити такі елементи статті: вступ, постановка проблеми, аналіз останніх досліджень і публікацій, мета статті, методи дослідження, висновки.**

– дотримано науковий стиль викладення матеріалу статті

– оформлено посилання на кожне запозичення у тексті та відображено джерела у бібліографічному списку.

– обсяг статті не менше ніж 5 сторінок, та не більше ніж 25 сторінок.

Усі статті проходять процедуру експертної оцінки статей (перевірку на плагіат, здійснення редколегією внутрішнього та зовнішнього (за необхідністю) незалежного рецензування статей, що готуються до опублікування).

3. До редколегії Збірника має бути подано:

1. електронний варіант статті у форматі DOC та PDF;

2. рецензію на статтю;

3. експертний висновок про можливість опублікування матеріалів;

4. довідку про авторів, місце роботи, повна поштова адреса (вулиця, корпус, будинок, назва населеного пункту, країна, індекс), номери телефонів, електронна пошта та ORCID: двома мовами – українською та англійською. Збір та обробка персональних даних здійснюються відповідно до вимог Закону України «Про захист персональних даних».

5. структуровану анотацію українською та англійською мовами (мета, методика, результати, наукова новизна, практична значимість), обсягом від 250 до 300 слів з вирівнюванням по ширині. Анотація має обов'язково містити ключові слова (5 – 10 слів).

6. ліцензійний договір на використання твору (за умови прийняття статті до друку).

7. статтю, оформлену згідно вимог і завізовану власноручно підписом автора, за умови прийняття статті до друку. Відповідальність за матеріали, наведені у статті, несе автор.

4. Вимоги до рукопису:

Матеріал треба викладати стисло, послідовно, стилістично грамотно. Не допускаються повтори, а також зайві подробиці під час переказу раніше опублікованих відомостей – замість цього подаються посилання на літературні джерела.

Текстові матеріали готуються та друкуються на аркушах білого одностороннього паперу з використанням комп'ютерних текстових редакторів Microsoft Word for Windows, для набору формул використовують вбудовані редактори рівнянь, табличні матеріали можуть готуватись з використанням електронних таблиць (Microsoft Excel). При цьому має застосовуватись шрифт Times New Roman.

Цитати, таблиці, статистичні дані, цифрові показники, що підвищують рівень аналітичних матеріалів, подаються з посиланням на джерела. Відповідальність за наведені показники несе автор. Терміни та позначення повинні відповідати чинним стандартам. Одиниці вимірювання слід подавати лише за міжнародною системою одиниць SI чи в одиницях, допущених до застосування в Україні згідно з вимогами чинних державних стандартів.

Остання сторінка статті має бути заповнена текстовою інформацією не менше, ніж на 50 відсотків.

Для авторів – не громадян України переклад назви статті, відомостей про автора, анотації та ключових слів на українську мову не є обов'язковим.

5. Вимоги до технічного оформлення статей

5.1. Параметри сторінки Збірника встановлені такі:

- розмір сторінки – 210x297 (A4)
- орієнтація книжна
- поля верхні та бокові – 35 мм;
- поле нижнє – 45 мм;
- відступ від верхнього колонтитула – 12 мм;
- відступ від нижнього колонтитула – 20 мм.

Верхній і нижній колонтитули, а також номери сторінок не вводити.

5.2. Матеріали набирають такими шрифтами:

- **УДК** – 11 пунктів, курсив, вирівнювання тексту по лівому краю (Індекс УДК має містити не більше 30 символів, разом із розділовими знаками та пробілами);
- **автори** – 12 пунктів, напівжирний курсив вирівнювання тексту по лівому краю, без абзацного відступу;
- **Відомості про авторів** – 11 пунктів, вирівнювання тексту по лівому краю, без абзацного відступу;
- **НАЗВА СТАТТІ** – усі прописні літери, 12 пунктів, напівжирний вирівнювання тексту по центру;
- **анотація** – 11 пунктів, напівжирний курсив вирівнювання тексту по ширині;
- Напис **«Ключові слова»** – 11 пунктів, напівжирний курсив, а самі ключові слова – шрифтом 11 пунктів, курсив (5–12 окремих слів та/або у складі декількох словосполучень) – з вирівнюванням по ширині;
- **основний текст** – 11 пунктів, звичайний вирівнювання тексту по ширині;

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

- *слова Рисунок, Таблиця, Діаграма, Схема та їхні номери* – 11 пунктів, курсив;

Рис. 1. Зовнішній вигляд

Таблиця 1. – Окремі характеристики

- **назви рисунків, таблиць, діаграм, схем** – 11 пунктів, напівжирний, вирівнювання тексту по центру;
- **© Дьоміна А. К., 2026** – 11 пунктів, напівжирний курсив вирівнювання тексту по лівому краю;
- **заголовки в підрозділі** – 11 пунктів, напівжирний, вирівнювання тексту по лівому краю.
- **ЛІТЕРАТУРА** – 11 пунктів, напівжирний, вирівнювання тексту по центру;
- **блок англійською мовою та латиницею** – формат відповідає вимогам до оформлення статті: повний список (спів)авторів, відомості про (спів)авторів, назва статті, анотація, ключові слова. Розташовується по ширині сторінки після ЛІТЕРАТУРИ.
- **Джерела в списку літератури** – 9 пунктів звичайним шрифтом, вирівнювання тексту по ширині.

Уся робота оформлюється шрифтом Times New Roman чорного кольору, без підкреслень і будь-яких кольорових виділень.

5.3. Інтервали між елементами матеріалу такі:

- УДК – автори – 2;
- автори – назва статті – 3;
- назва статті – анотація – 2;
- анотація – ключові слова – 0;
- ключові слова – основний текст – 1;
- основний текст – назва таблиці (верхній край рисунка, схеми, діаграми) – 2;
- назва таблиці – її верхній край (нижній край рисунка, діаграми, схеми – їхні назви) – 1;
- нижній край таблиці (назва рисунка, діаграми, схеми) – основний текст – 2;
- основний текст – знак авторського права – 1;
- основний текст – ЛІТЕРАТУРА – 1;
- ЛІТЕРАТУРА – список літератури – 1.
- Текст, формули, таблиці розміщуються на сторінці в одній колонці. Відступ першого рядка абзацу – 5 мм, інтервал між рядками – одинарний.
- Рисунки, діаграми, схеми дозволяється розміщувати в 2 колонки у разі подання їх групою під однією спільною назвою, при цьому всі зображення мають бути розміщені на одній сторінці;
- Кожна наступна адреса та дані для листування починаються з нового рядка.
- Не рекомендовано:
 - здійснювати ущільнення або розрідження інтервалів між літерами;
 - відбивати абзаци табуляціями або багаторазовими пробілами;
 - між ініціалами та прізвищем ставиться нерозривний пробіл (Ctrl+Shift+пробіл).

5.4. Вимоги до таблиць, діаграм, ілюстративного матеріалу:

Усі рисунки, таблиці, діаграми повинні мати назви та номери (у випадку, коли в одному матеріалі міститься два і більше названих елементів):

Якщо після тематичного заголовка підпису наводиться розшифрування, то між ними ставиться двокрапка і розміщену далі розшифровку набирають шрифтом 9 пт, наприклад:

Рис. 15. Дискове гальмо:

1 – гальмівний диск; 2 – кліщовий механізм

Слід використовувати лише графічні елементи, виконані у графічних редакторах із високою якістю деталей. Фотографії повинні бути чіткими і контрастними. Якщо на фотографіях потрібно вказати номери (позиції), то це виконується у графічному редакторі.

Написи на ілюстрації можливі двох видів: 1) написи на самій ілюстрації проти відповідних деталей; 2) позначення цифрами або літерами з виносом тексту написів у відповідний текст або під рисунком підпис. У статтях, призначених для кваліфікованого читача, немає потреби зберігати написи на ілюстраціях, тобто другий варіант є прийнятнішим.

Назви та номери таблиць розміщується над таблицями, а рисунків, діаграм, схем – під ними. Відривати назви від зазначених елементів забороняється. Посилання в тексті на таблиці даються у скороченому вигляді: «табл. 1», – звичайним шрифтом.

У статті тільки в разі нагальної потреби і в обмеженій кількості допускаються таблиці, розгорнуті по вертикалі (альбомна орієнтація).

Таблиці набираються в Microsoft Word.

Однаковий за характером таблиці повинні бути оформлені одноманітно по всьому виданню (шрифти, лінійки, заголовки і граfi, розбивка між рядками і т.д.).

Таблиця має бути надрукована якомога ближче до першого посилання на неї в тексті.

Якщо таблиця не вміщається на одній сторінці, всі її колонки нумерують, а над перенесеною частиною таблиці справа надписують: «Продовження таблиці 1» або «Закінчення таблиці 1»

- **Забороняється** розмішувати окремі об'єкти (ілюстрації, підрисуночні підписи, формули) у середині **таблиці**

5.5. Вимоги до формул:

При використанні формул необхідно дотримуватися певних техніко-орфографічних правил.

Графічні файли з формулами, графіками, рисунками, схемами та фотографіями повинні бути розташовані в тексті в рамці Microsoft Word. Номер формули проставляється справа в кінці рядка, в круглих дужках, не виходячи на поле. Формули розташовуються на сторінці по центру. Між ними та текстом витримують інтервал в один рядок.

Для набору формул використовується вбудований редактор рівнянь Microsoft Word for Windows. Латинські літери та позначення величин (символи) набирають курсивом, українські літери – тільки прямим шрифтом.

Пояснення значень символів і числових коефіцієнтів треба подавати безпосередньо під формулою в тій послідовності, в якій вони дані у формулі. Значення кожного символу і числового коефіцієнта треба подавати з нового рядка. Перший рядок пояснення починають зі слова «де» без двокрапки.

Рівняння і формули треба виділяти з тексту вільними рядками. Вище і нижче кожної формули потрібно залишити не менше одного вільного рядка. Якщо рівняння не вміщується в один рядок, його слід перенести після знака рівності (=) або після знаків плюс (+), мінус (–), множення (·) і ділення (:).

Загальне правило пунктуації в тексті з формулами таке: формула входить до речення як його рівноправний елемент. Тому в кінці формул і в тексті перед ними розділові знаки ставлять відповідно до правил пунктуації.

Двокрапку перед формулою ставлять лише у випадках, передбачених правилами пунктуації: а) у тексті перед формулою є узагальнююче слово; б) цього вимагає побудова тексту, що передує формулі.

Розділовими знаками між формулами, котрі йдуть одна за одною і не відокремлені текстом, можуть бути кома або крапка з комою безпосередньо за формулою до її номера.

Для перевірки правильності написання формул та розміщення графічних елементів просимо надавати публікацію також в **PDF** форматі, тому що різні версії програмного забезпечення текстових редакторів можуть бути несумісні і змінювати зміст статті.

5.6. ЛІТЕРАТУРА (бібліографічний опис джерел, використаних при підготовці статті, мовою оригіналу) та оформлений згідно зі стандартом ДСТУ 8302:2015.

- обсяг – 7-20 джерел (за виключенням оглядових статей);
- більша частина джерел має відображати сучасний стан наукових досліджень та бути не старша 10 років;
 - DOI, за наявності, має бути наведено у кінці посилання
- Всі бібліографічні описи джерел подаються мовою оригіналу. При посиланні на використану літературу потрібно зазначити назву використаного видання та (у квадратних дужках звичайним шрифтом) його номер у списку, наприклад: «...і визначаються тарифною схемою Прейскуранта 0–01 [2]».
- самоцититування не має перевищувати 20 % від загальної кількості посилань
- у переліку бажано зазначити сучасну англomовну літературу з ретроспективою не більше 5 років.
- після англomовної анотації подається **REFERENCES** – транслітерований список літератури (латинськими літерами), оформлений згідно стандарту APA (American Psychological Association).

Транслітерований список літератури, відповідно до вимог наукометричних баз SCOPUS та Web of Science, є повним аналогом списку літератури і виконується шляхом транслітерації мови оригіналу латиницею. При цьому порядок і кількість джерел у списку літератури мають залишатися незмінними. Посилання на англomовні джерела не транслітеруються.

Під час складання транслітерованого списку літератури рекомендовано користуватися положеннями Постанови КМ України від 27 січня 2010 року № 55 «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею» затверджує офіційну транслітерацію українського алфавіту латиницею та встановлює діючі правила транслітерації прізвищ та імен громадян України латиницею в закордонних паспортах. Он-лайн транслітератор (<http://translit.kh.ua/?passport>).

REQUIREMENTS FOR ARTICLE SUBMISSION

1. The Editorial Board of the State Enterprise «UkrNDIV» accepts research and scientific and technical papers on a regular basis for publication in the Collection of scientific papers «Raibound Rolling Stock», which is issued twice a year (June and December of the current year), with the following submission deadlines for articles to the Editorial Board:

by May 15 (publication date is June);

by November 15 (publication date is December).

Languages of publication: Ukrainian, English, German.

2. Criteria for article selection by the Editorial Board

Only scientific articles corresponding to the thematic scope of the journal and containing the following mandatory elements are accepted for publication in the Collection of scientific papers:

-statement of the problem in a general form and its connection with important scientific or practical tasks;

-analysis of recent studies and publications in which the solution of the given problem was initiated and on which the author relies;

-identification of previously unresolved parts of the general problem addressed in the article; formulation of the article objectives (task setting);

-presentation of the study material with full substantiation of the obtained scientific results;

-finding of the study and prospects for further studies in this field.

-In order to comply with the above requirements, **the following article elements should be highlighted in bold typeface: Introduction, Problem Statement, Analysis of Recent Research and Publications, Purpose of the Article, Research Methods, Conclusions.**

-the article shall comply with the scientific style of presentation;

-references to every borrowed source shall be provided in the text and listed in the References;

-the article length shall be no less than 5 pages and no more than 25 pages.

All articles undergo an expert evaluation procedure (plagiarism check, internal editorial review, and, if necessary, external independent peer review of articles prepared for publication).

3. Documents to be submitted to the Editorial Board:

1. electronic version of the article in DOC and PDF formats;

2. review of the article;

3. expert conclusion regarding the possibility of publication of the materials;

4. information about the authors, place of employment, full postal address (street, building/unit, name of the settlement, country, postal code), phone numbers, e-mail address, and ORCID in two languages, i.e., Ukrainian and English. Collection and processing of personal data are carried out in accordance with the requirements of the Law of Ukraine «On Personal Data Protection»;

5. structured abstract in Ukrainian and English (purpose, methodology, results, scientific novelty, practical significance), containing from 250 to 300 words and justified alignment. The abstract must contain keywords (5–10 words);

6. license agreement for the use of the work (provided that the article is accepted for publication);

7. article formatted in accordance with the requirements and personally signed by the author, provided that the article is accepted for publication. The author bears responsibility for the materials presented in the article.

4. Requirements for the Manuscript

The material shall be presented concisely, consistently, and stylistically correctly. Repetitions and excessive details when presenting previously published information are not allowed; instead, references to literary sources shall be provided.

Text materials shall be prepared and printed on white uniform paper using Microsoft Word for Windows text editors. Built-in equation editors shall be used for formulas, and tables may be prepared using spreadsheets (Microsoft Excel). Times New Roman font shall be used.

Quotations, tables, statistical data, and numerical indicators enhancing the analytical level of the material shall be accompanied by references to the sources. The author bears responsibility for the provided data. Terms and designations shall comply with current standards. Units of measurement shall be presented only in the International System of Units (SI) or in units permitted for use in Ukraine in accordance with applicable state standards.

The last page of the article shall be filled with text information by at least 50%.

For authors who are not citizens of Ukraine, translation of the article title, author information, abstract, and keywords into Ukrainian is optional.

5. Requirements for technical formatting of articles

5.1. The page settings for the Collection are as follows:

- pagesize: 210 × 297 mm (A4);
- portrait orientation;
- top and side margins: 35 mm;
- bottom margin: 45 mm;
- header distance from top: 12 mm;
- footer distance from bottom: 20 mm.

Headers, footers, and page numbers shall not be inserted.

5.2. The manuscript shall be typed in the following fonts:

- **UDC**: 11 pt, italic, left aligned (the UDC index shall contain no more than 30 characters including punctuation marks and spaces);
- **Authors**: 12 pt, bold italic, left aligned, without paragraph indentation;
- **Author details**: 11 pt, left aligned, without paragraph indentation;
- **ARTICLE TITLE**: uppercase letters, 12 pt, bold, centered;
- **Abstract**: 11 pt, bold italic, justified;
- the words «**Keywords**»: 11 pt, bold italic; keywords themselves – 11 pt italic (5–12 separate words and/or phrases), justified;
- **main text**: 11 pt, regular, justified;
- the words *Figure, Table, Diagram, Scheme and their numbers*: 11 pt, italics;

Fig. 1. General view

Table 1. – Specific characteristics

- **titles of figures, tables, diagrams, and schemes:** 11 pt, bold, centered;
 - **© Dyomina A.K., 2018:** 11 pt, bold italic, left aligned;
 - **subsection headings:** 11 pt, bold, left aligned;
 - **REFERENCES:** 11 pt, bold, centered;
 - **text section in English and Cyrillic** shall comply with the article formatting requirements: full list of co-authors, author information, article title, abstract, keywords. It shall be placed across the page width after REFERENCES;
 - **Sources in the References:** 9 pt, regular, justified.
- The entire work shall be formatted in black Times New Roman font without underlining or colored highlighting.

5.3. Spacing Between Elements

Spacing between material elements shall be as follows:

- UDC – authors: 2;
- Authors – articletitle: 3;
- articletitle – abstract: 2;
- abstract – keywords: 0;
- keywords – maintext: 1;
- main text – table title (upper edge of figure, scheme, diagram): 2;
- table title – upper edge of table (lower edge of figure, diagram, scheme – their titles): 1;
- lower edge of table (title of figure, diagram, scheme) – main text: 2;
- maintext – copyrightsign: 1;
- maintext – REFERENCES: 1;
- REFERENCES – bibliographylist: 1.

Text, formulas, and tables shall be placed in one column. First-line paragraph indentation: 5 mm, line spacing: single.

Figures, diagrams, and schemes may be placed in two columns if presented as a group under one common title, provided all images are placed on one page.

Each subsequent address and correspondence information shall begin on a new line.

Not recommended:

- condensing or expanding letter spacing;
- creating paragraph indents with tabs or multiple spaces;
- initials and surname shall be separated by a non-breaking space (Ctrl+Shift+Space).

5.4. Requirements for tables, diagrams, and illustrations

All figures, tables, and diagrams shall have titles and numbers (if two or more such elements are used in one article).

If explanatory notes follow the thematic title of a caption, a colon shall be placed between them, and the explanatory notes shall be typed in 9 pt font, for example:

Fig. 15. Disc brake:

1 – brake disc; 2 – caliper mechanism

Only graphic elements created in graphic editors with high-quality detailing shall be used. Photographs shall be clear and contrastive. If numbering (positions) is required on photographs, it shall be done in a graphic editor.

Captions on illustrations may be of two types: 1) captions directly on the illustration near the corresponding parts; 2) designation by numbers or letters with explanations provided in the text or figure caption. For articles intended for qualified readers, preserving captions directly on illustrations is unnecessary; therefore, the second option is preferable.

Titles and numbers of tables shall be placed above tables, while those of figures, diagrams, and schemes shall be placed below them. Separating titles from the corresponding elements is prohibited. References to tables in the text shall be given in abbreviated form: «Table 1», in regular font.

Landscape-oriented tables are allowed only in cases of urgent necessity and in limited quantity.

Tables shall be prepared in Microsoft Word.

Tables of the same nature shall be formatted uniformly throughout the publication (fonts, borders, headings, spacing between rows, etc.).

A table shall be placed as close as possible to its first reference in the text.

If a table does not fit on one page, all columns shall be numbered, and the continuation shall contain the note on the right: «Continuation of Table 1» or «End of Table 1».

It is prohibited to place separate objects (illustrations, figure captions, formulas) **inside tables**.

5.5. Requirements for Formulas

When using formulas, certain technical and orthographic rules shall be observed.

Graphic files containing formulas, graphs, figures, schemes, and photographs shall be placed in Microsoft Word frames. Formula numbers shall be placed on the right at the end of the line in parentheses without extending into the margins. Formulas shall be centered on the page. A one-line spacing shall be maintained between formulas and text.

The built-in Microsoft Word for Windows equation editor shall be used for typing formulas. Latin letters and symbols shall be italicized, while Ukrainian letters shall be typed in regular font only.

Explanations of symbols and numerical coefficients shall be provided directly below the formula in the order in which they appear in the formula. Each symbol and coefficient explanation shall begin on a new line. The first explanatory line shall begin with the word «where» without a colon.

Equations and formulas shall be separated from the text by blank lines. At least one blank line shall be left above and below each formula. If an equation does not fit on one line, it shall be broken after the equality sign (=) or after plus (+), minus (–), multiplication (·), or division (:) signs.

The general punctuation rule for formulas in the text is as follows: a formula is considered an integral part of the sentence. Therefore, punctuation marks before and after formulas shall comply with punctuation rules.

A colon before a formula shall be used only when required by punctuation rules: a) if the preceding text contains a generalizing word; b) if required by the structure of the preceding text.

Punctuation marks between formulas placed consecutively without intervening text may be commas or semicolons placed directly after the formula before its number.

To verify the correctness of formulas and graphical elements placement, authors are requested to provide the publication also in PDF format, since different software versions of text editors may be incompatible and may alter the article content.

5.6. REFERENCES (bibliographic description of sources used in preparing the article in the original language) shall be formatted in accordance with DSTU 8302:2015.

- number of references: 7–20 sources (except review articles);
- most sources shall reflect the current state of scientific research and be no older than 10 years;
- DOI, if available, shall be indicated at the end of the reference.

All bibliographic sources shall be provided in the original language. When referring to literature sources, the title of the cited publication and its number in square brackets shall be indicated, for example: «...and are determined by the tariff scheme of Price List 0–01 [2].»

Self-citation shall not exceed 20% of the total number of references.

The list should preferably include modern English-language literature not older than 5 years.

After the English abstract, **REFERENCES**, i.e., a transliterated bibliography list in Latin script formatted according to the APA (American Psychological Association) standard shall be provided.

The transliterated bibliography list, in accordance with the requirements of citation databases such as SCOPUS and Web of Science, shall be a complete analogue of the reference list and shall be created by transliterating the original language into Latin script. The order and number of sources in the reference list shall remain unchanged. English-language sources shall not be transliterated.

When compiling the transliterated bibliography list, it is recommended to follow the provisions of the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 55 dated January 27, 2010 «On Standardization of Transliteration of the Ukrainian Alphabet into Latin», which approves the official transliteration of the Ukrainian alphabet into Latin script and establishes valid transliteration rules for Ukrainian citizens' surnames and given names in passports for traveling abroad. Online transliteration tool: (<http://translit.kh.ua/?passport>).